

---

# Spalovací zařízení

## Seznam cvičení 2020/2021

---

1. Organizační záležitosti, úvod do problematiky paliv
2. Složení tuhých paliv a přepočty stavu
3. Přepočty stavu paliv (**téma písemky**)
4. Vlastnosti biomasy – přepočty
5. Vlastnosti kapalných a plyných paliv
6. Stechiometrie spalování tuhých a kapalných paliv (**téma písemky**)
7. Přebytek vzduchu při spalování paliv
8. Stanovení přebytku vzduchu
9. Spalování plyných paliv (**téma písemky**)
10. Nedokonalé spalování
11. Emise ze spalování paliv
12. Energetická účinnost kotlů (**program**)

## cvičení 2

### Složení tuhých paliv a přepočet stavu

Každý typ paliva má specifické fyzikální vlastnosti, které jsou určeny především obsahem:

- vlhkosti – symbol **W**
- popelovin – symbol **A**
- hořlavých složek (hlavní prvky C, S, O, N, H a další stopové prvky) – symbol **h**

Uhlí je typickým představitelem paliva, ve kterém jsou zastoupeny všechny tři složky. Čím starší uhlí, tím méně vlhkosti a popelovin obsahuje. Starší uhlí je proto více kvalitní a jeho spalování má menší dopad na životní prostředí.

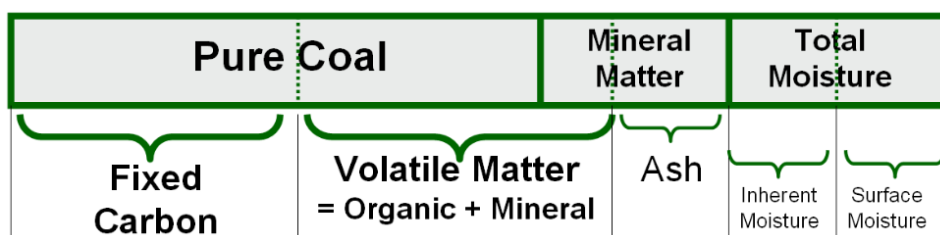
Vznik uhlí v průběhu času



Typické vlastnosti

	Výhřevnost [MJ/kg]	Vlhkost W [%]	Popelovina A [%]	Uhlík C [%]	Síra S [%]
Antracit	30 - 35	< 5	< 10	85 - 98	< 1
Černé uhlí	23 - 32	2 - 15	3 - 12	45 - 85	0,4 - 4
Hnědé uhlí	9 - 23	30 - 60	10 - 50	25 - 45	0,4 - 3
Suché dřevo	14	20	< 1	35 - 40	0
Dřevo	8	50	< 1	20 - 25	0

Schématické složení uhlí



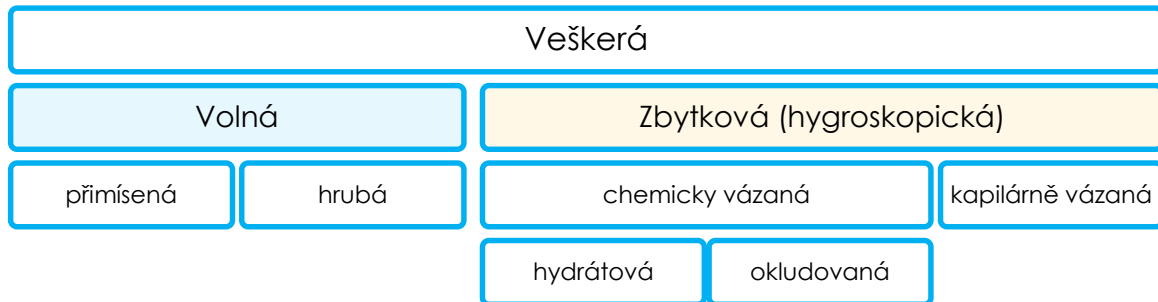
Pure coal = hořlavina, mineral matter = popelovina, total moisture = voda, fixed carbon = tuhý uhlík, volatile matter = prchavá hořlavina, ash = popel

Hrubý rozbor:

$$W + A + h = 100 \%$$

### Voda v palivu:

Voda se nachází v každém tuhém palivu (v poměrně velkém rozsahu) a představuje jednu ze základních palivových charakteristik.



Hrubé vody se zbavíme volným vysycháním na vzduchu. Kapilární voda se odstraní sušením při 105 °C. Voda chemicky vázaná (hydrátová v popelovině a okludovaná v hořlavině) se běžnou analýzou nestanovuje – uvolňuje se až při teplotách rozkladu paliva.

### Vliv vody v palivu na provoz energetických zařízení:

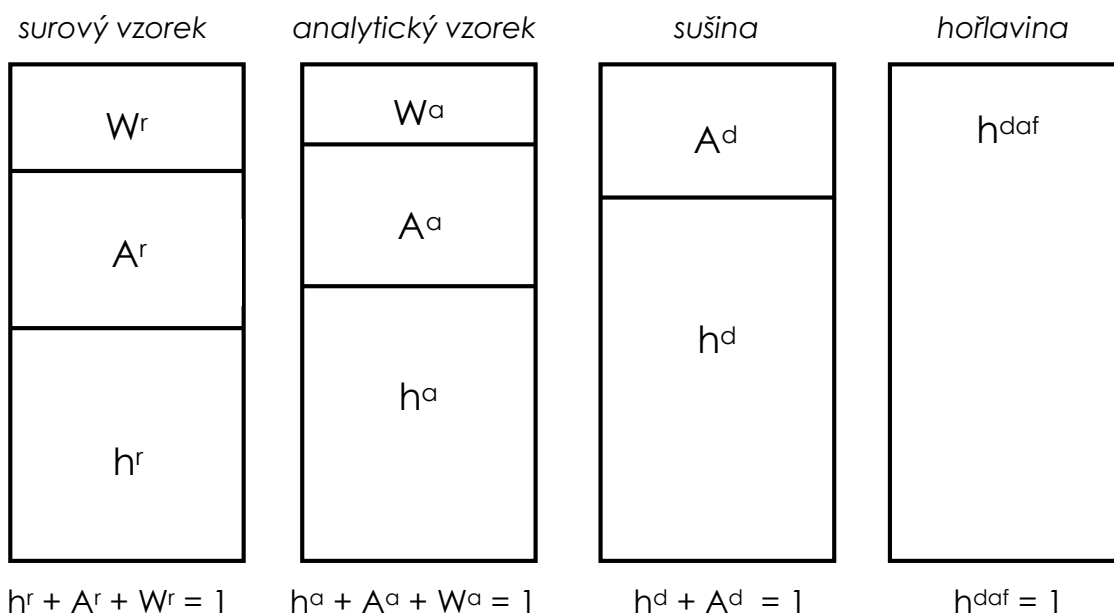
- prodlužuje dobu zapalování paliva
- snižuje spalovací teplotu
- zvětšuje objem spalin a tím i komínovou ztrátu
- způsobuje korozi
- zhoršuje se melitelnost (u práškových kotlů)

### Prvkový rozbor:

$$W + A + C + S + H + N + O = 100 \%$$

C, S, H – aktivní prvky      N, O – pasivní prvky

### Stavy paliv:



Složky paliva v jednom stavu mohou být převedeny do jiného stavu pomocí rovnic přepočtu stavu.

### Rovnice přepočtu stavu:

a→r	d→r	daf→r	daf→d
$X^r = X^a \cdot \frac{1 - W^r}{1 - W^a}$	$X^r = X^d \cdot (1 - W^r)$	$X^r = X^{daf} \cdot (1 - W^r - A^r)$	$X^d = X^{daf} \cdot (1 - A^d)$

X označuje A, C, H, S, N, O nebo Q<sub>n</sub> (**nikdy Q<sub>i</sub>!**)

### Energetické parametry:

Výhřevnost – symbol Q<sub>i</sub>

Energie uvolněná úplným spálením paliva za předpokladu, že voda v palivu přejde a zůstane v plynném skupenství.

Spalné teplo – symbol Q<sub>n</sub>

Energie uvolněná při spalování paliva za předpokladu, že voda v palivu po odpaření zkondenzuje.

Rozdíl mezi výhřevností a spalným teplem je tedy v energii spotřebované na změnu skupenství vody.

### Přepočet Q<sub>n</sub>-Q<sub>i</sub>:

$$Q_n = Q_i + 2453 \cdot (W + 9 \cdot H_2) \quad [\text{kJ}/\text{kg}]$$

$$\text{vždy } Q_n \geq Q_i$$

#### Příklad 1

Surový vzorek uhlí obsahuje 28 % vody a 22 % popelovin. Po částečném sušení v laboratoři má uhlí už jen 18 % vody. Proveďte hrubý rozbor tohoto analytického vzorku.

$$h^r = 1 - A^r - W^r = 1 - 0,22 - 0,28 = 0,5 = 50 \%$$

$$h^a = h^r \cdot \frac{1 - W^a}{1 - W^r} = 0,5 \cdot \frac{1 - 0,18}{1 - 0,28} = 0,57 = 57 \%$$

$$A^a = 1 - W^a - h^a = 1 - 0,18 - 0,57 = 0,25 = 25 \%$$

#### Příklad 2

Vypočítejte procentní změnu výhřevnosti surového vzorku uhlí s obsahem 26 % vody a 23 % popelovin, u kterého bylo sušením dosaženo snížení obsahu vody na 13 %. Výhřevnost surového vzorku uhlí při 5% obsahu vodíku je 12,6 MJ/kg. (Uhlí je nejspíše průmyslová směs z dolu Bílina).

$$A^a = A^r \cdot \frac{1 - W^a}{1 - W^r} = 23 \cdot \frac{1 - 0,13}{1 - 0,26} = 27 \%$$

$$H^a = H^r \cdot \frac{1 - W^a}{1 - W^r} = 5 \cdot \frac{1 - 0,13}{1 - 0,26} = 5,9 \%$$

$$Q_n^r = Q_i^r + (W^r + 9 \cdot H^r) \cdot 2,453 = 12,6 + (0,26 + 9 \cdot 0,05) \cdot 2,453 = 14,34 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$Q_n^a = Q_n^r \cdot \frac{1 - W^a}{1 - W^r} = 14,34 \cdot \frac{1 - 0,13}{1 - 0,26} = 16,86 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$Q_i^a = Q_n^a - (W^a + 9 \cdot H^a) \cdot 2,453 = 16,86 - (0,13 + 9 \cdot 0,059) \cdot 2,453 = 15,24 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$\Delta = \frac{Q_i^a - Q_i^r}{Q_i^r} \cdot 100 = \frac{15,24 - 12,6}{12,6} \cdot 100 = 21 \%$$

### Příklad 3

Jaká bude výhřevnost sokolovského uhlí, jestliže se jeho sušením sníží obsah vody na polovinu? Jaká je hodnota spalného tepla tohoto paliva zcela vysušeného? Kolik energie musíme přivést, abychom vysušili 5 kg daného surového paliva o teplotě 25°C? Výhřevnost surového vzorku je 20,79 MJ/kg s následujícím složením: H<sub>2</sub> 3,8 %; C 46,6 %; S 0,9 %; N<sub>2</sub> 0,7% ; O<sub>2</sub> 16,5 %; A 6,9 %; W 24,6 %. (Uhlí bude patrně kostka 2 pro komunální sféru).

$$H^a = H^r \cdot \frac{1 - W^a}{1 - W^r} = 3,8 \cdot \frac{1 - 0,123}{1 - 0,246} = 4,42 \%$$

$$Q_n^r = Q_i^r + 2,453 \cdot (W^r + 9 \cdot H_2^r) = 20,79 + 2,453 \cdot (0,246 + 9 \cdot 0,038) = 22,23 \text{ MJ/kg}$$

Výhřevnost vysušeného paliva:

$$Q_n^d = \frac{Q_n^r}{(1 - W^r)} = \frac{22,23}{1 - 0,246} = 29,49 \text{ MJ/kg}$$

Výhřevnost vzorku s polovičním obsahem vody (analytický):

$$Q_n^a = Q_n^r \cdot \frac{1 - W^a}{1 - W^r} = 22,23 \cdot \frac{1 - 0,123}{1 - 0,246} = 25,86 \text{ MJ/kg}$$

$$Q_i^a = Q_n^a + 2,453 \cdot (W^a + 9 \cdot H_2^a) = 25,86 + 2,453 \cdot (0,123 + 9 \cdot 0,042) = 24,59 \text{ MJ/kg}$$

Tepelná energie pro vysušení surového paliva:

$$Q = \dot{m} \cdot (c_p \cdot \Delta t + l_v) = 5 \cdot 0,246 \cdot (4,2 \cdot 75 + 2453) = 3404 \text{ kJ/kg}$$

## cvičení 3

### Přepočty stavu paliv

#### Příklad 4

Po 3 h sušení 5 g surového vzorku uhlí při teplotě 105 °C byl zjištěn úbytek na váze 1,3 g, přičemž dalším sušením už nedošlo ke změně hmotnosti. Poté byl vzorek vložen do muflové žhací pece, v níž byla 2 h při teplotě 815°C spalována hořlavina, takže konečná hmotnost vzorku byla 0,5 g. Vzorkováno bylo z mosteckého uhlí o výhřevnosti 19,8 MJ/kg ( $r$ ) a obsahu vodíku v hořlavině 6,2 % (daf).

Vypočítejte obsah popeloviny a hořlaviny v sušině a spalná tepla s výhřevnostmi ve všech stavech.

Sušením se zbavíme vody:

$$W^r = \frac{\Delta m}{m_0} = \frac{1,3}{5} = 0,26 = 26 \%$$

Žháním získáme popel:

$$A^r = \frac{m_2}{m_0} = \frac{0,5}{5} = 0,1 = 10 \%$$

Sušina:

$$A^d = \frac{A^r}{(1 - W^r)} = \frac{10}{(1 - 0,26)} = 13,51 \%$$

$$H^d = H^{daf} \cdot (1 - A^d) = 6,2 \cdot (1 - 0,135) = 5,36 \%$$

Surový vzorek:

$$H^r = H^{daf} \cdot (1 - A^r - W^r) = 6,2 \cdot (1 - 0,1 - 0,26) = 3,97 \%$$

$$Q_n^r = Q_i^r + 2,453 \cdot (W^r + 9 \cdot H^r) = 19,8 + 2,453 \cdot (0,26 + 9 \cdot 0,0397) = 21,31 \text{ MJ/kg}$$

Sušina:

$$Q_n^d = \frac{Q_n^r}{(1 - W^r)} = \frac{21,31}{(1 - 0,26)} = 28,80 \text{ MJ/kg}$$

$$Q_i^d = Q_n^d - 2,453 \cdot (9 \cdot H^d) = 28,8 - 2,453 \cdot (9 \cdot 0,0536) = 27,62 \text{ MJ/kg}$$

Hořlavina:

$$Q_n^{daf} = \frac{Q_n^r}{(1 - W^r - A^r)} = \frac{21,31}{(1 - 0,26 - 0,1)} = 33,30 \text{ MJ/kg}$$

$$Q_i^{daf} = Q_n^{daf} - 2,453 \cdot (9 \cdot H^{daf}) = 33,3 - 2,453 \cdot (9 \cdot 0,062) = 31,93 \text{ MJ/kg}$$

#### Příklad 5

Prvkovým rozbořem hořlaviny uhlí bylo zjištěno 70 % uhlíku, 4 % síry, 14 % vodíku, 5 % dusíku, kyslík tvoří zbytek (hmotnostně). Stejně uhlí obsahuje v surovém stavu 20 % vody a v sušině 6,5 % popela. Spalné teplo sušiny je 23 500 kJ/kg.

Vypočtete výhřevnost sušiny, spalné teplo a výhřevnost surového vzorku, výhřevnost a spalné teplo hořlaviny a složení paliva v surovém stavu.

$$O^{daf} = 100 - C^{daf} - H^{daf} - S^{daf} - N^{daf} = 100 - 70 - 14 - 4 - 5 = 7 \%$$

Surový vzorek:

$$A^r = A^d \cdot (1 - W^r) = 6,5 \cdot (1 - 0,2) = 5,2 \%$$

$$C^r = C^{daf} \cdot (1 - W^r - A^r) = 70 \cdot (1 - 0,2 - 0,052) = 52,36 \%$$

$$H^r = H^{daf} \cdot (1 - W^r - A^r) = 14 \cdot (1 - 0,2 - 0,052) = 10,47 \%$$

$$S^r = S^{daf} \cdot (1 - W^r - A^r) = 4 \cdot (1 - 0,2 - 0,052) = 2,99 \%$$

$$N^r = N^{daf} \cdot (1 - W^r - A^r) = 5 \cdot (1 - 0,2 - 0,052) = 3,74 \%$$

$$O^r = O^{daf} \cdot (1 - W^r - A^r) = 7 \cdot (1 - 0,2 - 0,052) = 5,24 \%$$

$$Q_n^r = Q_n^d \cdot (1 - W^r) = 23500 \cdot (1 - 0,2) = 18800 \text{ kJ/kg}$$

$$Q_i^r = Q_n^r - 2453 \cdot (W^r + 9 \cdot H^r) = 18800 - 2453 \cdot (0,2 + 9 \cdot 0,1047) = 15998 \text{ kJ/kg}$$

Sušina:

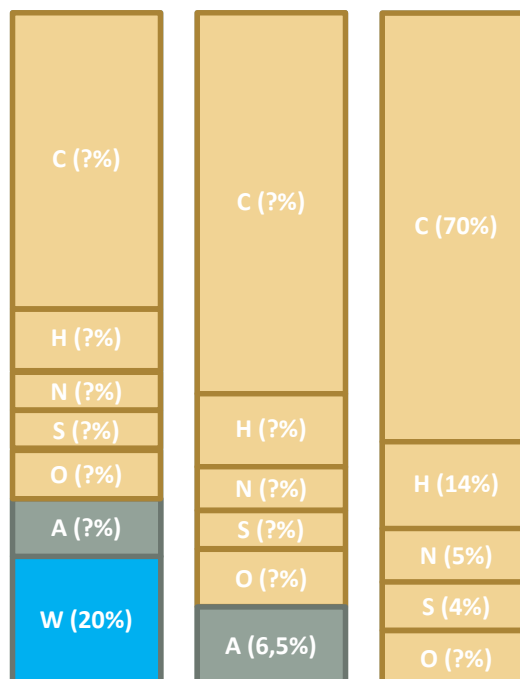
$$H^d = H^{daf} \cdot (1 - A^d) = 14 \cdot (1 - 0,065) = 13,09 \%$$

$$Q_i^d = Q_n^d - 2453 \cdot (9 \cdot H^d) = 23500 - 2453 \cdot (9 \cdot 0,1309) = 20610 \text{ kJ/kg}$$

Hořlavina:

$$Q_n^{daf} = \frac{Q_n^d}{(1 - A^d)} = \frac{23500}{(1 - 0,065)} = 25134 \text{ kJ/kg}$$

$$Q_i^{daf} = Q_n^{daf} - 2453 \cdot (9 \cdot H^{daf}) = 25134 - 2453 \cdot (9 \cdot 0,14) = 22043 \text{ kJ/kg}$$

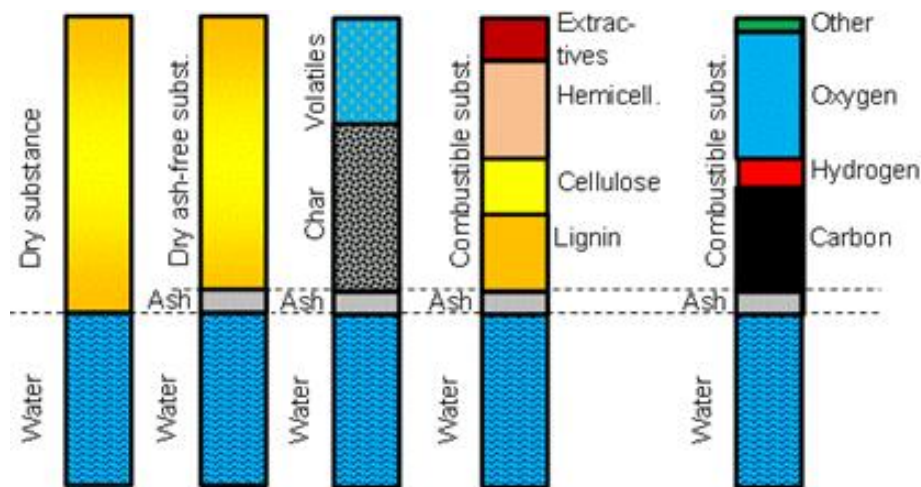


## cvičení 4

### Vlastnosti biomasy

Z pohledu hrubého a prvkového rozboru se biomasa od uhlí liší:

- velmi širokým rozsahem obsahu vlhkosti
- velmi nízkým obsahem popelovin
- vysokým podílem prchavé hořlaviny (vodík, kyslík)
- téměř nulovou koncentrací síry



Tyto a mnoho dalších parametrů ovlivňují průběh spalovacího procesu (prchavka, voda) a dopady na životní prostředí (síra, popel).

#### Vlastnosti

	Dřevo	Kůra	Sláma	Tráva	Obilí	Rýžové slupky
Vlhkost	50	55-65	55	60		9
Popelovina (sušina)	0,5	2,3	4,7	9	2	15
Prchavka (sušina)	85	73	77	73		65
S (hořlavina)	0,01	0,03	0,07	0,15	0,1	0,08
Cl (hořlavina)	0,01	0,03	0,2	0,07	0,07	-
Qi [MJ/kg](sušina)	18,5	19	17,6	17,1	16,9	16,2

Obsah C, H a O v hořlavině je podobný pro většinu biomasy (typicky C 50 %, H %, O 43 %).

Výhřevnost zcela suchého dřeva se pohybuje v poměrně úzkém rozsahu 18,5 až 19 MJ/kg, zatímco u zemědělské biomasy to je 16,5 až 19 MJ/kg.

Spalování biomasy je často spojeno s korozí (Cl), abrazí (křemičitany v popelovině), zanášením a spékáním (nízká teplota tavení vlivem draslíku).



### Energetická hustota:

- biomasa – 2 500 – 11 000 MJ/m<sup>3</sup> (6 800 skládaný buk při 15 % W<sup>r</sup>, 4 000 sypaná štěpka borovice při 30 % W<sup>r</sup>, 11 000 sypané dřevní pelety při 8 % W<sup>r</sup>),
- uhlí – 10 000 – 36 000 MJ/m<sup>3</sup>

Nižší energetická hustota biomasy vede k vyšším nákladům výroby energie (elektřiny, tepla) kvůli ceně dopravy a větším rozměrům technologie.

### Příklad 6

V parním kotli s roštovým ohništěm je spalována stromová kůra s obsahem vody 34,3 %. Kůra v surovém stavu má výhřevnost 10,8 MJ/kg a obsahuje: C 33 %, O 27,2 %, H 3,9 %, N 0,9 %, A 0,7 %.

Vypočítejte spalné teplo v surovém stavu, dále určete složení hořlaviny a její výhřevnost.

Spalné teplo:

$$Q_n^r = Q_i^r + 2,453 \cdot (W^r + 9 \cdot H^r) = 10,8 + 2,453 \cdot (0,343 + 9 \cdot 0,039) = 12,50 \text{ MJ/kg}$$

Přepočet na hořlavinu:

$$Q_n^{daf} = \frac{Q_n^r}{(1 - W^r - A^r)} = \frac{12,50}{(1 - 0,343 - 0,007)} = 19,23 \text{ MJ/kg}$$

$$C^{daf} = \frac{C^r}{(1 - W^r - A^r)} = \frac{33}{(1 - 0,343 - 0,007)} = 50,8 \%$$

$$O^{daf} = \frac{O^r}{(1 - W^r - A^r)} = \frac{27,2}{(1 - 0,343 - 0,007)} = 41,8 \%$$

$$H^{daf} = \frac{H^r}{(1 - W^r - A^r)} = \frac{3,9}{(1 - 0,343 - 0,007)} = 6 \%$$

$$N^{daf} = \frac{N^r}{(1 - W^r - A^r)} = \frac{0,09}{(1 - 0,343 - 0,007)} = 1,4 \%$$

Výhřevnost:

$$Q_i^{daf} = Q_n^{daf} - 2,453 \cdot 9 \cdot H^{daf} = 19,23 - 2,453 \cdot 9 \cdot 0,06 = 17,91 \text{ MJ/kg}$$

Kontrola:

$$\sum \text{prvky} = C^{daf} + O^{daf} + H^{daf} + N^{daf} = 50,8 + 41,8 + 6 + 1,4 = 100 \%$$

### Příklad 7

Laboratorním rozbořem hořlaviny bylo stanoveno toto složení bukového dřeva: H 5,87 %; C 50,12 %; N 0,23 %; O 43,78 %. Výhřevnost sušiny je 18,51 MJ/kg a spalné teplo 19,8 MJ/kg. V surovém vzorku je 0,22 popela.

Zjistěte výhřevnosti a spalná tepla surového vzorku při 7, 20 a 35 % vody v palivu.

Vodík v sušině:

$$Q_i^d = Q_n^d - 2453 \cdot 9 \cdot H^d \rightarrow H^d = \frac{Q_n^d - Q_i^d}{2453 \cdot 9} = \frac{19,8 - 18,51}{2453 \cdot 9} = 0,05843 = 5,843 \%$$

Popel v sušině:

$$H^d = H^{daf} \cdot (1 - A^d) \rightarrow A^d = 1 - \frac{H^d}{H^{daf}} = 1 - \frac{0,05843}{0,0587} = 0,00457 = 0,457 \%$$

Surový vzorek:

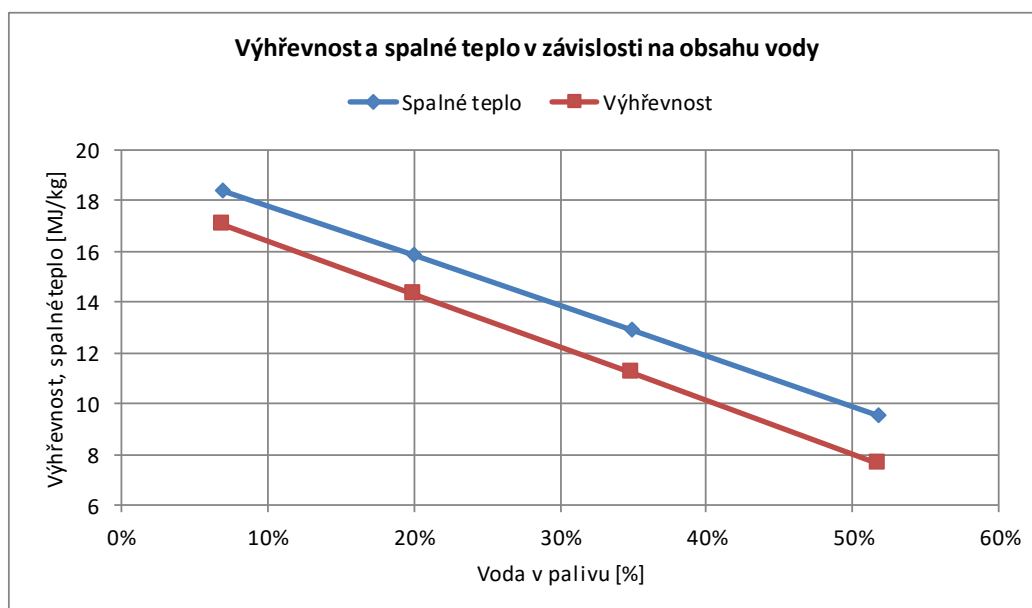
$$A^r = A^d \cdot (1 - W^r) \rightarrow W^r = 1 - \frac{A^r}{A^d} = 1 - \frac{0,0022}{0,00457} = 0,5184 = 51,84 \%$$

$$H^r = H^{daf} \cdot (1 - A^r - W^r) = 5,87 \cdot (1 - 0,0022 - 0,5184) = 2,814 \%$$

$$Q_n^r = Q_n^d \cdot (1 - W^r) = 19,8 \cdot (1 - 0,5184) = 9,54 \text{ MJ/kg}$$

$$Q_i^r = Q_n^r - 2453 \cdot (W^r + 9 \cdot H^r) = 9,54 - 2453 \cdot (0,5184 + 9 \cdot 0,02814) = 7,64 \text{ MJ/kg}$$

$W^r$	51,84 %	35 %	20 %	7 %
$Q_n$ [MJ/kg]	9,54	12,87	15,84	18,41
$Q_i$ [MJ/kg]	7,64	11,17	14,32	17,04
$m$ [kg]	1	0,83	0,68	0,55
$\Delta Q_i$ [%]	-	46	87	123



Pozn.: Vlhkost 7 % mají pelety, 20 % zhruba rok až dva sušené dřevo, cca 50 % má čerstvě pokácené dřevo.

## cvičení 5

### Vlastnosti kapalných a plyných paliv

#### Kontext:

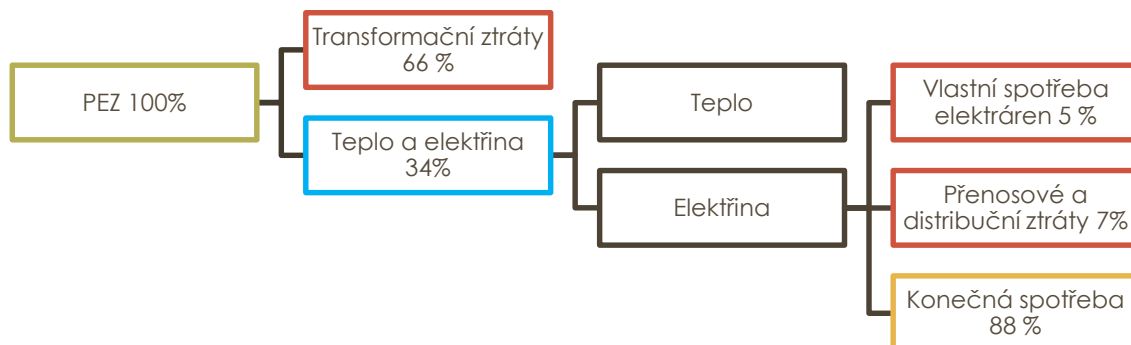
Energetický sektor produkující teplo a elektřinu spotřebovává cca 40 % všech primárních energetických zdrojů (PEZ), z nichž 87 % zaujímají fosilní paliva (viz tabulka). Podíl ropy a zemního plynu v tomto sektoru je však v porovnání s uhlím výrazně menší.

*Spotřeba primární energie ve světě (2017)*

Sektor	Ropa	Zemní plyn	Uhlí	Jaderná energie	OZE	CELKEM [milion toe]
Všechny sektory	35 %	24 %	28 %	2 %	11 %	13 500
Energetika	3 %	20 %	41 %	12 %	24 %	5 600

toe – tuna ropného ekvivalentu (41,87 GJ); OZE – vodní, větrná a sluneční energie, biomasa, geotermální energie, odpady

#### Elektrická účinnost



#### Kapalná paliva

**Teplota vzplanutí** – nejnižší teplota, při které se výpary paliva vznítí po přiložení iniciačního zdroje (jiskra, oheň aj.)

**Teplota hoření** – nejnižší teplota, při které vznikají výpary paliva v takovém množství, že po oddálení iniciačního zdroje trvale hoří; je o 10-60°C vyšší než teplota vzplanutí

**Viskozita** – charakterizuje tření mezi molekulami vlivem přitažlivých sil; silně závisí na teplotě a ovlivňuje plynulost dodávky a dávkování paliva

#### Nejběžnější paliva:

**Benzín** – nejvíce užívané kapalné palivo (motory aut), extrémně těkavý a snadno spalitelný

**Nafta** – hustší a méně těkavá, snadnější výroba (méně náročné zpracování ropy)

**Kerosin** – palivo pro spalovací turbíny

**Mazut** – těžký topný olej nízké kvality (vysoký obsah síry – 3,5 % i více), využíván ve velkých parních kotlích

**Těžký topný olej** – využíván k zapalování a stabilizaci plamene v uhelných elektrárnách, dále jako palivo ve špičkových zdrojích, musí být ohříván pro snazší dopravu a dávkování

**Stlačený zemní plyn (CNG)** – čisté spalování, nízká teplota varu (vyžaduje vysoké stlačení, tj. 20-25 MPa), výhřevnost 47 MJ/kg

**Zkapalněný ropný plyn (LPG)** – směs propanu a butanu, snadněji stlačitelný, ale spalování méně čisté, výhřevnost 46 MJ/kg.

**Bionafta** – výroba transesterifikací rostlinných olejů, výhřevnost 37,5 MJ/kg

*Vlastnosti produktů ropy*

Vlastnost	LPG	Benzín	Kerosin	Diesel	LTO	TTO
Výhřevnost [MJ/kg]	46	43,5	43	42,6	40,4	39
Teplota vzplanutí [°C]	-104	-43	38-72	38-95	68-167	71-121
Teplota varu [°C]	20	150	200	300	370	500

Kapalná paliva jsou směsí nasycených ( $C_xH_y$ ) a nenasycených ( $C_mH_n$ ) uhlovodíků s určitým obsahem síry, dusíku a kyslíku.

*Typické elementární složení kapalných paliv (původem z ropy)*

Vlastnost	C	H	S	N	O
Hm. koncentrace [%]	82-87	12-14	0-8	0-2	0-4

### **Plynná paliva běžně používaná k výrobě energie:**

**Zemní plyn** – přirozeně se vyskytující uhlovodíkový plyn

**Vodní plyn** – plyn vyrobený z páry proudící přes rozpálený koks

**Koksárenský plyn** – vedlejší produkt výroby koksu (pyrolýza uhlí)

**Generátorový plyn** – plyn vyrobený zplyňováním uhlí nebo i biomasy (dřevoplyn) vzduchem nebo vodní parou

**Vysokopecní plyn** – vedlejší produkt při redukci železných rud ve vysoké peci

**Důlní plyn (karbonský zemní plyn, degazační plyn)** – plyn odvětrávaný z uhelných dolů

**Syngas (syntetický plyn)** – obvykle produkt zplyňování (uhlí, biomasa) nebo parního reformingu (rozklad plynných a kapalných uhlovodíků parou)

**Bioplyn** – vyráběný anaerobní digescí organické hmoty; bioplynem je skládkový plyn, bioplyn z ČOV a bioplyn ze zemědělských BPS

Výhody plynných paliv:

- Obsah balastu (voda, popelovina) je velmi nízký – do 1 %.
- Ekologie – spalováním vzniká málo znečišťujících látek (emise)
- Snadná mísitelnost se vzduchem (atomizace není potřeba)
- Snadné zapálení
- Snadné řízení spalovacího procesu – stálá rychlost hoření
- Mnoho způsobů využití (kotle, turbíny, spalovací motory aj.)

Typické složení a vlastnosti plynných paliv

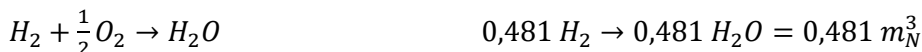
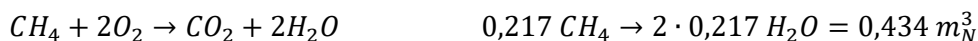
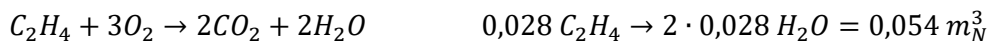
Plyn	CH <sub>4</sub> [%]	H <sub>2</sub> [%]	CO [%]	CO <sub>2</sub> [%]	N <sub>2</sub> [%]	Ostat. [%]	Výhřevnost [MJ/m <sup>3</sup> ]	Teor. spalovací teplota [°C]
Vysokopeční	1	3	28	10	58	-	3,7	1400
Generátorový	1	13	28	5	52	1	5,2	1740
Vodní	1	50	40	5	4	-	10,5	2215
Koksárenský	22	58	7	2	8	3	16,3	2140
Bioplyn (ČOV)	60	1	-	35	1	3	21,1	-
Zemní	96	-	-	2	2	-	34,1	2030

Výhřevnost za normálních podmínek – teplota 0°C a tlak 101,325 kPa

### Příklad 8

Vypočítejte spalné teplo a výhřevnost plynu o objemovém složení: CO<sub>2</sub> 3,6 %, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 2,8 %, O<sub>2</sub> 0,4 %, CO 12 %, CH<sub>4</sub> 21,7 %, H<sub>2</sub> 48,1 %, N<sub>2</sub> 11,4 %. Určete, o jaký druh plynu by se mohlo jednat?

Množství vodní páry vzniklé dokonalým spálením plynu:



Spálením 1 m<sup>3</sup> plynu vznikne 0,969 m<sup>3</sup> vodní páry, což je:

$$m_{H_2O} = V \cdot \rho_{H_2O} = 0,969 \cdot \frac{18}{22,4} = 0,78 \text{ kg}$$

Výhřevnost a spalné teplo:

a)

Složka	Objemová koncentrace [%]	$Q_n$ [kJ/m <sup>3</sup> složky]	$Q_n$ poměr [kJ/m <sup>3</sup> plynu]	$Q_i$ [kJ/m <sup>3</sup> složky]	$Q_i$ poměr [kJ/m <sup>3</sup> plynu]
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	2,8	64 016	1 792	59 500	1 666
CO	12	12 700	1 524	12 700	1 524
CH <sub>4</sub>	21,7	39 888	8 656	35 800	7 769
H <sub>2</sub>	48,1	12 790	6 151	10 760	5 176
Celkem			<b>18 124</b>		<b>16 134</b>
			<b>5,03 kWh/m<sup>3</sup></b>		<b>4,48 kWh/m<sup>3</sup></b>

$$1 \text{ kWh} = 1000 \text{ Wh} = 1000 \cdot 3600 \text{ Ws} = 3600 \text{ kJ} = 3,6 \text{ MJ}$$

b)

$$Q_i = Q_n - 2453 \cdot m_{H_2O} = 18124 - 2453 \cdot 0,78 = 16 211 \text{ kJ/m}^3$$

**Podle složení a výhřevnosti se jedná o koksárenský plyn.**

## cvičení 6

### Stechiometrie spalování tuhých a kapalných paliv

**Spalování** – chemická reakce mezi palivem a okysličovadlem za vzniku plynných produktů a tepelné energie.

Existují dva druhy spalování:

- dokonalé (stechiometrické) – všechno palivo shoří a ve spalinách nezůstane žádná spalitelná látka – ve většině praktických aplikací nedosažitelný stav
- nedokonalé – vlivem nedostatku okysličovadla palivo celé neshoří a/nebo ve spalinách jsou přítomny spalitelné látky

**Spalovací rovnice:**

spalování uhlíku	spalování síry	
$C + O_2 \rightarrow CO_2$	$S + O_2 \rightarrow SO_2$	
$1 \text{ kmol} + 1 \text{ kmol} \rightarrow 1 \text{ kmol}$	$1 \text{ kmol} + 1 \text{ kmol} \rightarrow 1 \text{ kmol}$	
$12 \text{ kg} + 32 \text{ kg} \rightarrow 44 \text{ kg}$	$32 \text{ kg} + 32 \text{ kg} \rightarrow 64 \text{ kg}$	
$12 \text{ kg} + 22,4 \text{ m}^3 \rightarrow 22,4 \text{ m}^3$	$32 \text{ kg} + 22,4 \text{ m}^3 \rightarrow 22,4 \text{ m}^3$	
spalování vodíku	plyny přecházející přímo do spalin (se stopovými produkty jako NO, N <sub>2</sub> O)	
$2 \cdot H_2 + O_2 \rightarrow 2 \cdot H_2O$	$N_2 \rightarrow N_2$	$H_2O (l) \rightarrow H_2O (g)$
$2 \text{ kmol} + 1 \text{ kmol} \rightarrow 2 \text{ kmol}$	$1 \text{ kmol} \rightarrow 1 \text{ kmol}$	$1 \text{ kmol} \rightarrow 1 \text{ kmol}$
$4 \text{ kg} + 32 \text{ kg} \rightarrow 36 \text{ kg}$	$28 \text{ kg} \rightarrow 28 \text{ kg}$	$18 \text{ kg} \rightarrow 18 \text{ kg}$
$4 \text{ kg} + 22,4 \text{ m}^3 \rightarrow 44,8 \text{ m}^3$	$28 \text{ kg} \rightarrow 22,4 \text{ m}^3$	$18 \text{ kg} \rightarrow 22,4 \text{ m}^3$

Pozn: Rovnice představují počáteční a konečný stav a nenaznačují skutečný průběh chemické reakce, která může zahrnovat mnoho dílčích reakcí a dílčích produktů.

V rovnicích je uvažováno s ideálním plynem, reálné plyny mají molární objem mírně odlišný (viz tabulka).

Molární objemy v m<sup>3</sup>/kmol za normálních podmínek (101,325 kPa, 0°C)

Ideální plyn	Skutečný plyn					
	CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO
22,41	22,26	21,89	22,40	22,40	22,39	22,40

V průběhu spalovacího procesu nejdříve shoří veškerý vodík na vodu a síra na oxid siřičitý. Pak předpokládáme, že všechny uhlík shoří na oxid uhelnatý a následně zbývajícím kyslíkem na oxid uhličitý.

Okysličovadlem může být přímo kyslík, atmosférický vzduch, obohacený vzduch (>21% O<sub>2</sub>) nebo sloučeniny obsahující kyslík (např. N<sub>2</sub>O). Pro účely výpočtu spalování uvažujeme, že **suchý vzduch** je dvousložková směs s přibližným složením dle tabulky.

Plynná složka	Skutečný suchý vzduch [%]	Přibližné složení	
		objemové [%]	hmotnostní [%]
N <sub>2</sub>	78,1	79	76,9
O <sub>2</sub>	20,9	21	23,1
Ar	0,9	-	-
CO <sub>2</sub>	0,04	-	-
Zbytek	0,06	-	-

Spalovací rovnice jsou užitečné pro:

- výpočet správného množství **spalovacího vzduchu** pro dané palivo
- stanovení množství a složení **produktů spalování** za účelem návrhu spalovacích zařízení a volbu jeho provozního režimu

Výpočty mohou být provedeny několika způsoby – molárně, hmotnostně, objemově, kombinovaně. Výpočet požadovaného množství vzduchu pro tuhá a kapalná paliva je nejlépe provádět kombinovaně (prvky paliva hmotnostně, okysličovadlo a produkty hoření objemově).

Stechiometrické množství spalovacího vzduchu – teoreticky (minimálně) požadované množství pro dokonalé spálení paliva.

$$V_{O,t} = \frac{22,4}{12} \cdot C + \frac{22,4}{4} \cdot H + \frac{22,4}{32} \cdot S - \frac{22,4}{32} \cdot O$$

kyslík potřebný k
spálení uhlíku
spálení vodíku
spálení síry
kyslík v palivu

Množství spalovacího vzduchu se počítá ze složení **suchého vzduchu**, přestože v praxi je obvykle dodáván vzduch vlhký.

$$V_{vz,t}^s = \frac{V_{O,t}}{0,21} \left[ \frac{m_N^3}{kg} \right]$$

Za běžných spalovacích teplot se dusík chová jako inertní látka, která ovšem velice významně ovlivňuje spalovací proces kvůli jeho množství, a také ovlivňuje spalovací teplotu. Za vysokých teplot dusík reaguje s kyslíkem a vytváří oxidy dusíku, které jsou škodlivinou (znečišťující látkou).

**Produkty spalování** – primárně CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> a vodní pára s minoritními plyny jako jsou SO<sub>2</sub>, a NO<sub>x</sub>.



Pokud je spalování nedokonalé, ve spalinách se objeví vysoké koncentrace CO a kyslíku.

Stechiometrický (teoretický) objem vlhkých spalin ( $m_N^3/kg$ ):

$V_{sp,t}^v =$	$\frac{22,4}{12} \cdot C$	$+ \frac{22,4}{32} \cdot S$	$+ \frac{22,4}{2} \cdot H$	$+ \frac{22,4}{18} \cdot W$	$+ \frac{22,4}{28} \cdot N$	$+ 0,79 \cdot V_{vz,t}^s$
vlhké spaliny obsahují	CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	vodní páru z vodíku	vodní páru z vody	dusík z paliva	dusík ze vzduchu

Výše uvedený vzorec platí pouze pro suchý spalovací vzduch. Pokud je ke spalování použit vlhký vzduch (většina případů), ve spalinách se navíc objeví **vodní pára ze spalovacího vzduchu** (viz další cvičení).

Měřicí aparatury užívané ke stanovení koncentrací plynných složek analyzují suchý vzorek spalin, proto se velice často můžeme setkávat se složením suchých spalin.

### Příklad 9

Vypočítejte stechiometrické množství suchého vzduchu potřebného pro dokonalé spálení dřeva a tomu odpovídající množství spalin včetně jejich složení. Dřevo má složení: C<sup>r</sup> = 39,5 %; H<sup>r</sup> = 4,3 %; O<sup>r</sup> = 33 %; N<sub>2</sub><sup>r</sup> = 0,2 %; W<sup>r</sup> = 22 %; A<sup>r</sup> = 1 %.

Stechiometrický kyslík:

$$V_{O,t} = \frac{22,4}{12} \cdot C + \frac{22,4}{4} \cdot H + \frac{22,4}{32} \cdot S - \frac{22,4}{32} \cdot O$$

$$V_{O,t} = \frac{22,4}{12} \cdot 0,395 + \frac{22,4}{4} \cdot 0,043 - \frac{22,4}{32} \cdot 0,33 = 0,747 \text{ m}_N^3/kg$$

Stechiometrický spalovací **suchý vzduch**:

$$V_{vz,t} = \frac{V_{O,t}}{0,21} = \frac{0,747}{0,21} = 3,558 \text{ m}_N^3/kg$$

Složky spalin:

$$V_{CO_2,t} = \frac{22,4}{12} \cdot C = \frac{22,4}{12} \cdot 0,395 = 0,737 \text{ m}_N^3/kg$$

$$V_{N_2,t} = \frac{22,4}{28} \cdot N + 0,79 \cdot V_{vz,t} = \frac{22,4}{28} \cdot 0,002 + 0,79 \cdot 3,558 = 2,813 \text{ m}_N^3/kg$$

$$V_{H_2O,t} = \frac{22,4}{18} \cdot W + \frac{22,4}{2} \cdot H = \frac{22,4}{18} \cdot 0,22 + \frac{22,4}{2} \cdot 0,043 = 0,755 \text{ m}_N^3/kg$$

Stechiometrické množství **suchých spalin**:

$$V_{sp,t}^s = V_{CO_2,t} + V_{SO_2,t} + V_{N_2,t} = 0,737 + 0 + 2,813 = 3,550 \text{ m}_N^3/kg$$

Stechiometrické množství **vlhkých spalin**:

$$V_{sp,t}^v = V_{vz,t}^s + V_{H_2O,t} = 3,550 + 0,755 = 4,305 \text{ m}_N^3/kg$$

Složení vlhkých spalin:

$$CO_2 = \frac{V_{CO_2,t}}{V_{sp,t}^v} = \frac{0,737}{4,305} = 0,1712 = 17,12 \% \quad N_2 = \frac{V_{N_2,t}}{V_{sp,t}^v} = \frac{2,813}{4,305} = 0,6533 = 65,33 \%$$

$$H_2O = \frac{V_{H_2O,t}}{V_{sp,t}^v} = \frac{0,755}{4,305} = 0,1754 = 17,54 \%$$

$$\sum X_i = CO_2 + N_2 + H_2O = 17,12 + 65,33 + 17,54 \cong 100 \%$$

### Příklad 10

Proveďte ten samý výpočet jako v příkladu 9 s tím rozdílem, že palivem je uhlí obsahující 58,3 % C, 0,4 % S, 6,2 % H, 12,7 % O, 0,9 % N, 13 % W a 8,5 % A (vše v surovém stavu).

Stechiometrický kyslík:

$$V_{O,t} = \frac{22,4}{12} \cdot C + \frac{22,4}{4} \cdot H + \frac{22,4}{32} \cdot S - \frac{22,4}{32} \cdot O$$

$$V_{O,t} = \frac{22,4}{12} \cdot 0,583 + \frac{22,4}{4} \cdot 0,062 + \frac{22,4}{32} \cdot 0,004 - \frac{22,4}{32} \cdot 0,127 = 1,349 \text{ m}_N^3/\text{kg}$$

Stechiometrický spalovací **suchý vzduch**:

$$V_{vz,t} = \frac{V_{O,t}}{0,21} = \frac{1,349}{0,21} = 6,426 \text{ m}_N^3/\text{kg}$$

Složky spalin:

$$V_{CO_2,t} = \frac{22,4}{12} \cdot C = \frac{22,4}{12} \cdot 0,583 = 1,088 \text{ m}_N^3/\text{kg}$$

$$V_{SO_2,t} = \frac{22,4}{32} \cdot S = \frac{22,4}{32} \cdot 0,004 = 0,003 \text{ m}_N^3/\text{kg}$$

$$V_{N_2,t} = \frac{22,4}{28} \cdot N + 0,79 \cdot V_{vz,t} = \frac{22,4}{32} \cdot 0,009 + 0,79 \cdot 6,426 = 5,087 \text{ m}_N^3/\text{kg}$$

$$V_{H_2O,t} = \frac{22,4}{18} \cdot W + \frac{22,4}{2} \cdot H = \frac{22,4}{18} \cdot 0,13 + \frac{22,4}{2} \cdot 0,062 = 0,856 \text{ m}_N^3/\text{kg}$$

Stechiometrické množství **suchých spalin**:

$$V_{sp,t}^s = V_{CO_2,t} + V_{SO_2,t} + V_{N_2,t} = 1,088 + 0,003 + 5,087 = 6,179 \text{ m}_N^3/\text{kg}$$

Stechiometrické množství **vlhkých spalin**:

$$V_{sp,t}^v = V_{sp,t}^s + V_{H_2O,t} = 6,179 + 0,856 = 7,035 \text{ m}_N^3/\text{kg}$$

Složení vlhkých spalin:

$$CO_2 = \frac{V_{CO_2,t}}{V_{sp,t}^v} = \frac{1,088}{7,035} = 0,1547 = 15,47 \% \quad N_2 = \frac{V_{N_2,t}}{V_{sp,t}^v} = \frac{5,087}{7,035} = 0,7232 = 72,32 \%$$

$$SO_2 = \frac{V_{SO_2,t}}{V_{sp,t}^v} = \frac{0,003}{7,035} = 0,0004 = 0,04 \% \quad H_2O = \frac{V_{H_2O,t}}{V_{sp,t}^v} = \frac{0,856}{7,035} = 0,1217 = 12,17 \%$$

$$\sum X_i = CO_2 + N_2 + SO_2 + H_2O = 15,47 + 72,32 + 0,04 + 12,17 = 100 \%$$

I kvůli takto malému množství  $SO_2$  se musí instalovat odsiřovací zařízení a předcházet rizikům spojeným s korozí technologie.

Všimněte si, že pro dokonalé spálení uhlí je potřeba téměř dvojnásobné množství vzduchu než pro spálení dřeva (především kvůli tomu, že dřevo má násobně větší podíl kyslíku).

## cvičení 7

### Přebytek vzduchu při spalování tuhých paliv

Stechiometrické množství (teoretické, minimální) spalovacího vzduchu:

$$V_{O,t} = \frac{22,4}{12} \cdot C + \frac{22,4}{4} \cdot H + \frac{22,4}{32} \cdot S - \frac{22,4}{32} \cdot O$$

kyslík
spálení uhlíku
spálení
spálení síry
kyslík v palivu  
potřebný k

vodíku

Množství spalovacího vzduchu se počítá ze složení **suchého vzduchu**:

$$V_{vz,t}^s = \frac{V_{O,t}}{0,21} \left[ \frac{m_N^3}{kg} \right]$$

Ve většině praktických aplikací je využíván vzduch atmosférický, který obsahuje určité množství **vlhkosti**. Množství dodaného vzduchu proto musí být větší:

$$V_{vz,t}^v = V_{vz,t}^s \cdot v \left[ \frac{m_N^3}{kg} \right]$$

Koeficient  $v$  závisí na teplotě a relativní vlhkosti vzduchu  $\varphi$  (0 pro suchý vzduch, 1 nasycený vzduch). Pro běžné atmosférické podmínky je  $v$  mezi 1,01 až 1,04.

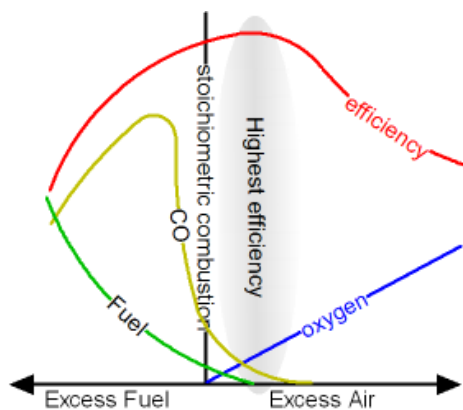
$$v = 1 + \frac{\varphi \cdot p_s}{p_c - \varphi \cdot p_s}$$

kde  $p_c$  je tlak celkový a  $p_s$  je tlak sytosti při dané teplotě vzduchu.

V praxi je nemožné dosáhnout dokonalého spalování při stechiometrických podmínkách. A jelikož nedokonalé spalování vede ke vzniku ztrát a toxických a jiných znečišťujících látek, snažíme se, aby spalovací zařízení bylo zásobeno určitým **přebytkem vzduchu**:

$$n = \frac{V_{vz,t}^s}{V_{vz,t}^v} = \frac{V_{vz,t}^v}{V_{vz,t}^s} \left[ \frac{m_N^3}{m_N^3} \right]$$

Nspotřebovaný kyslík a dusík z přebytečného vzduchu se objeví ve spalínách.



granulační ohniště	1,2
výtavné ohniště	1,15
roštové ohniště	1,3-1,5
cyklonové ohniště	1,05-1,1
plynový hořák	1,01-1,1
olejový hořák	1,01-1,15
kotel s ručním přikládáním	2-4
kotel s automat. přikládáním	2
otevřené krby	~20

Teoretické množství vlhkých spalin (stechiometrické, bez přebytku vzduchu):

$$V_{sp,t}^v = \frac{22,4}{12} \cdot C + \frac{22,4}{32} \cdot S + \frac{22,4}{2} \cdot H + \frac{22,4}{18} \cdot W + (v-1) \cdot V_{vz,t}^s + \frac{22,4}{28} \cdot N + 0,79 \cdot V_{vz,t}^s$$

spaliny oxid uhličitý oxid siřičitý pára z vodíku pára z vody v palivu pára ze spal. vzduchu dusík z paliva dusík ze vzduchu

Ve výše uvedené rovnici je již uvažováno s vlhkým spalovacím vzduchem.

Skutečné množství vlhkých spalin (dodáván přebytečný vzduch):

$$V_{sp,sk}^v = V_{sp,t}^v + (n-1) \cdot V_{vz,t}^v$$

spaliny teoretické množství dusík, kyslík a vodní pára z přebytku vzduchu

Tuto rovnici využijeme v případech, kdy nám stačí znát pouze celkové množství skutečných spalin a nikoliv jejich jednotlivé složky. V opačném případě je nejlepší způsob vypočítat všechny složky spalin samostatně a ty pak sečíst.

Objem dusíku ve skutečných spalinách:

$$V_{N_2,sk} = \frac{22,4}{28} \cdot N + 0,79 \cdot V_{vz,sk}^s = \frac{22,4}{28} \cdot N + 0,79 \cdot n \cdot V_{vz,t}^s$$

Objem kyslíku ve skutečných spalinách:

$$V_{O_2} = 0,21 \cdot (n-1) \cdot V_{vz,t}^s$$

Objem vodní páry ve skutečných spalinách:

$$V_{H_2O,sk} = \frac{22,4}{2} \cdot H + \frac{22,4}{18} \cdot W + (v-1) \cdot V_{vz,sk}^s$$

### Příklad 11

V granulačním ohništi je s přebytkem vzduchu 24 % spalován uhelný prášek o složení 78 % uhlíku, 2,3 % vodíku, 1,4 % síry, 1,9 % kyslíku, 0,9 % dusíku, 4 % vody a 11,5 % popeloviny (v surovém stavu). Stanovte objemové množství spalovacího vzduchu, objemové množství a složení vlhkých spalin. Koeficient zvětšení objemu vzduchu vlivem vlhkosti je 1,02.

Teoretický kyslík:

$$V_{O_2,t} = \frac{22,4}{12} \cdot C + \frac{22,4}{4} \cdot H + \frac{22,4}{32} \cdot S - \frac{22,4}{32} \cdot O$$

$$V_{O_2,t} = \frac{22,4}{12} \cdot 0,78 + \frac{22,4}{4} \cdot 0,023 + \frac{22,4}{32} \cdot 0,014 - \frac{22,4}{32} \cdot 0,019 = 1,58 \text{ m}_N^3/\text{kg}$$

Teoretický spalovací vzduch (suchý):

$$V_{vz,t}^s = \frac{V_{O_2,t}}{0,21} = \frac{1,58}{0,21} = 7,53 \text{ m}_N^3/\text{kg}$$

Skutečný spalovací vzduch (suchý):

$$V_{vz,sk}^s = n \cdot V_{vz,t}^s = 1,24 \cdot 7,53 = 9,34 \text{ m}_N^3/\text{kg}$$

Skutečný spalovací vzduch (vlhký):

$$V_{vz,sk}^v = v \cdot V_{vz,sk}^s = 1,02 \cdot 9,34 = 9,52 \text{ m}_N^3/\text{kg}$$

Složky skutečných suchých spalin:

$$V_{CO_2} = \frac{22,4}{12} \cdot C = \frac{22,4}{12} \cdot 0,78 = 1,46 \text{ m}_N^3/\text{kg}$$

$$V_{SO_2} = \frac{22,4}{32} \cdot S = \frac{22,4}{32} \cdot 0,014 = 0,01 \text{ m}_N^3/\text{kg}$$

$$V_{N_2} = \frac{22,4}{28} \cdot N + 0,79 \cdot V_{vz,sk}^s = \frac{22,4}{28} \cdot 0,009 + 0,79 \cdot 9,34 = 7,38 \text{ m}_N^3/\text{kg}$$

$$V_{O_2} = 0,21 \cdot (n - 1) \cdot V_{vz,t}^s = 0,21 \cdot (1,24 - 1) \cdot 7,53 = 0,38 \text{ m}_N^3/\text{kg}$$

Skutečné suché spaliny:

$$V_{sp,sk}^s = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{O_2} = 1,46 + 0,01 + 7,38 + 0,38 = 9,23 \text{ m}_N^3/\text{kg}$$

Vodní pára ve spalinách:

$$\begin{aligned} V_{H_2O} &= \frac{22,4}{18} \cdot W + \frac{22,4}{2} \cdot H + (v - 1) \cdot V_{vz,sk}^s = \frac{22,4}{18} \cdot 0,04 + \frac{22,4}{2} \cdot 0,023 + (1,02 - 1) \cdot 9,34 \\ &= 0,49 \text{ m}_N^3/\text{kg} \end{aligned}$$

Skutečné vlhké spaliny:

$$V_{sp,sk}^v = V_{sp,sk}^s + V_{H_2O} = 9,23 + 0,49 = 9,72 \text{ m}_N^3/\text{kg}$$

Složení vlhkých spalin:

$$CO_2 = \frac{V_{CO_2}}{V_{sp,sk}^v} = \frac{1,46}{9,72} = 14,97 \%$$

$$N_2 = \frac{V_{N_2}}{V_{sp,sk}^v} = \frac{7,38}{9,72} = 75,94 \%$$

$$SO_2 = \frac{V_{SO_2}}{V_{sp,sk}^v} = \frac{0,01}{9,72} = 0,1 \%$$

$$O_2 = \frac{V_{O_2}}{V_{sp,sk}^v} = \frac{0,38}{9,72} = 3,90 \%$$

$$H_2O = \frac{V_{H_2O}}{V_{sp,sk}^v} = \frac{0,49}{9,72} = 5,08 \%$$

$$\sum X_i = CO_2 + N_2 + SO_2 + O_2 + H_2O = 14,97 + 75,94 + 0,1 + 3,90 + 5,08 \cong 100 \%$$

### Příklad 12

Stanovte hmotnost potřebného spalovacího vzduchu a vzniklých spalin při dokonalém spalování hnědého uhlí s přebytkem vzduchu 50 %.

Složení surového uhlí: 50 % C; 3,8 % H<sub>2</sub>; 0,7 % S; 13,2 % O<sub>2</sub>; 0,6 % N<sub>2</sub>; 26,3 % W; 5,4 % A.

Stechiometrický kyslík:

$$m_{o,t} = \frac{32}{12} \cdot C + \frac{32}{4} \cdot H + \frac{32}{32} \cdot S - \frac{32}{32} \cdot O$$

$$m_{o,t} = \frac{32}{12} \cdot 0,5 + \frac{32}{4} \cdot 0,038 + \frac{32}{32} \cdot 0,007 - \frac{32}{32} \cdot 0,132 = 1,512 \text{ kg/kg}$$

Stechiometrický spalovací **suchý vzduch**:

$$m_{vz,t} = \frac{m_{o,t}}{0,231} = \frac{1,512}{0,231} = 6,546 \text{ kg/kg}$$

Skutečný spalovací **suchý vzduch**:

$$m_{vz,sk} = n \cdot m_{vz,t} = 1,5 \cdot 6,546 = 9,820 \text{ kg/kg}$$

Složky teoretických spalin:

$$m_{CO_2} = \frac{44}{12} \cdot C = \frac{44}{12} \cdot 0,5 = 1,833 \text{ kg/kg}$$

$$m_{SO_2} = \frac{64}{32} \cdot S = \frac{64}{32} \cdot 0,007 = 0,014 \text{ kg/kg}$$

$$m_{N_2} = N_2 + 0,769 \cdot V_{vz,t} = 0,006 + 0,769 \cdot 6,546 = 5,040 \text{ kg/kg}$$

$$m_{H_2O,t} = W + \frac{36}{4} \cdot H = 0,263 + \frac{36}{4} \cdot 0,038 = 0,605 \text{ kg/kg}$$

Teoretické spaliny vlhké:

$$m_{sp,t}^v = m_{CO_2} + m_{SO_2} + m_{N_2} + m_{H_2O,t} = 1,833 + 0,014 + 5,040 + 0,605 = 7,492 \text{ kg/kg}$$

Skutečné spaliny vlhké:

$$m_{sp,sk}^v = m_{sp,t}^v + (n - 1) \cdot m_{vz,t}^v = 7,492 + (1,5 - 1) \cdot 6,546 = 10,765 \text{ kg/kg}$$

## cvičení 8

### Stanovení přebytku vzduchu

Součinitel přebytku vzduchu může být vyjádřen jako násobek stechiometrického množství vzduchu:

$$n = \frac{\text{skutečný objem}}{\text{stechiometrický objem}} = \frac{V_{vz,s}}{V_{vz,t}} \quad \left[ \frac{m_N^3}{m_N^3} \right]$$

V praxi se ke stanovení součinitele přebytku vzduchu používají naměřené koncentrace kyslíku a/nebo oxidu uhličitého ve spalínách. Je důležité pamatovat na to, že změřené koncentrace se vztahují k **suchým spalínám**, protože s ohledem na bezpečný provoz analyzátoru je nejdříve ze spalín kondenzací odstraněna všechna přítomná voda.

	Z O <sub>2</sub>	Z CO <sub>2</sub>
Obecný výpočet	$n = 1 + \frac{O_{2,měř.}}{21 - O_{2,měř.}} \cdot \frac{V_{sp,t}^s}{V_{vz,t}^s}$	$n = 1 + \left( \frac{CO_{2,max}}{CO_{2,měř.}} - 1 \right) \cdot \frac{V_{sp,t}^s}{V_{vz,t}^s}$
Zjednodušený výpočet *	$n = \frac{21}{21 - O_{2,měř.}}$	$n = \frac{CO_{2,max}}{CO_{2,měř.}}$

\* použitelný pouze pro tuhá paliva (objem spalín a objem vzduchu je téměř stejný)

$CO_{2,max}$  – nejvyšší možná koncentrace je dosažena při dokonalém spalování za vzniku suchých teoretických spalín ( $n = 1$ , tj. spaliny nejsou naředěny přebytečným vzduchem)

#### Poznámka:

Takto stanovený přebytek je zejména u velkých kotlů o něco vyšší než přebytek, se kterým spalování skutečně proběhlo. Je to dáno tím, že kromě záměrně do ohniště přiváděného přebytečného vzduchu, se vlivem podtlaku v kotli do spalín dostává i přisávaný vzduch (tzv. falešný), který se na spalování nepodílí.

#### Příklad 13

Vypočítejte max. koncentraci CO<sub>2</sub> z dokonalého spálení koku a množství potřebného spalovacího vzduchu. Koks obsahuje 100 % uhlíku (zjednodušeně). Ve spalínách byla naměřena 15% koncentrace CO<sub>2</sub> a 6% koncentrace O<sub>2</sub>.

Teoretický kyslík:

$$V_{O_2,t} = \frac{22,4}{12} \cdot C = \frac{22,4}{12} \cdot 1 = 1,87 \text{ m}_N^3/\text{kg}$$



Teoretický vzduch:

$$V_{vz,t}^s = \frac{V_{O_2,t}}{0,21} = \frac{1,87}{0,21} = 8,91 \text{ m}_N^3/\text{kg}$$

Dusík ve spalínách:

$$V_{N_2,t} = 0,79 \cdot V_{vz,t} = 0,79 \cdot 8,91 = 7,04 \text{ m}_N^3/\text{kg}$$

Vzniklé CO<sub>2</sub>:

$$V_{CO_2} = \frac{22,4}{12} \cdot C = \frac{22,4}{12} \cdot 1 = 1,87 \text{ m}_N^3/\text{kg}$$

Spaliny suché teoretické:

$$V_{sp,t}^s = V_{N_2,t} + V_{CO_2} = 7,04 + 1,87 = 8,91 \text{ m}_N^3/\text{kg}$$

Max. koncentrace CO<sub>2</sub>:

$$CO_{2,max} = \frac{V_{CO_2}}{V_{sp,t}^s} \cdot 100 = \frac{1,87}{8,91} \cdot 100 = 21 \%$$

Součinitel přebytku vzduchu:

$$n = 1 + \left( \frac{CO_{2,max}}{CO_{2,měř.}} - 1 \right) \cdot \frac{V_{sp,t}^s}{V_{vz,t}^s} = 1 + \left( \frac{0,21}{0,15} - 1 \right) \cdot \frac{8,91}{8,91} = 1,4$$

nebo

$$n = 1 + \frac{O_{2,měř.}}{21 - O_{2,měř.}} \cdot \frac{V_{sp,t}^s}{V_{vz,t}^s} = 1 + \frac{6}{21 - 6} \cdot \frac{8,91}{8,91} = 1,4$$

#### Příklad 14

Vypočítejte max. koncentraci CO<sub>2</sub> z dokonalého spálení těžkého topného oleje a skutečné množství spalovacího vzduchu. Ve spalínách byla naměřena koncentrace CO<sub>2</sub> ve výši 14,9 %.

Složení oleje: 74 % C, 11 % H, 4 % N, 5 % O, 3 % S, 2 % W, 1 % A.

Teoretický kyslík:

$$V_{O_2,t} = \frac{22,4}{12} \cdot C + \frac{22,4}{4} \cdot H + \frac{22,4}{32} \cdot S - \frac{22,4}{32} \cdot O$$

$$V_{O_2,t} = \frac{22,4}{12} \cdot 0,74 + \frac{22,4}{4} \cdot 0,11 + \frac{22,4}{32} \cdot 0,03 - \frac{22,4}{32} \cdot 0,05 = 1,98 \text{ m}_N^3/\text{kg}$$

Teoretický vzduch:

$$V_{vz,t}^s = \frac{V_{O_2,t}}{0,21} = \frac{1,98}{0,21} = 9,44 \text{ m}_N^3/\text{kg}$$

Vzniklé CO<sub>2</sub>:

$$V_{CO_2} = \frac{22,4}{12} \cdot C = \frac{22,4}{12} \cdot 0,74 = 1,38 \text{ m}_N^3/\text{kg}$$

Vzniklé SO<sub>2</sub>:

$$V_{SO_2} = \frac{22,4}{32} \cdot S = \frac{22,4}{32} \cdot 0,03 = 0,02 \text{ m}_N^3/\text{kg}$$

Vzniklý dusík (teoretický):

$$V_{N_2,t} = 0,79 \cdot V_{vz,t}^s + \frac{22,4}{28} \cdot N = 0,79 \cdot 9,44 + \frac{22,4}{28} \cdot 0,04 = 7,49 \text{ m}_N^3/\text{kg}$$

Spaliny suché teoretické:

$$V_{sp,t}^s = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2,t} = 1,38 + 0,02 + 7,49 = 8,89 \text{ m}_N^3/\text{kg}$$

Max. koncentrace CO<sub>2</sub>:

$$CO_{2,max} = \frac{V_{CO_2}}{V_{sp,t}^s} \cdot 100 = \frac{1,38}{8,89} \cdot 100 = 15,52 \%$$

Součinitel přebytku vzduchu:

$$n = 1 + \left( \frac{CO_{2,max}}{CO_{2,měř.}} - 1 \right) \cdot \frac{V_{sp,t}^s}{V_{vz,t}^s} = 1 + \left( \frac{0,1552}{0,149} - 1 \right) \cdot \frac{8,89}{9,44} = 1,04$$

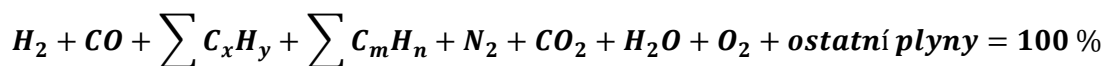
Skutečný spalovací vzduch suchý:

$$V_{vz,sk}^s = n \cdot V_{vz,t}^s = 1,04 \cdot 9,44 = 9,82 \text{ m}_N^3/\text{kg}$$

## cvičení 9

### Spalování plyných paliv

Plynná paliva obecně obsahují spalitelné látky jako je  $H_2$ , CO nebo uhlovodíky (nasyčené  $C_xH_y$  a nenasycené  $C_mH_n$ ) a nespalitelné látky jako je  $CO_2$ ,  $N_2$ ,  $O_2$  nebo vodní pára, které jsou obvykle vyjadřovány v objemových koncentracích.

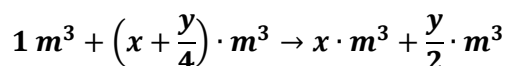
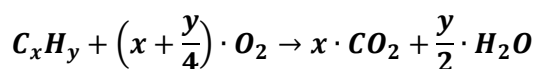


Spalovací rovnice:

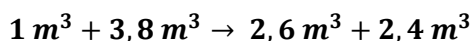
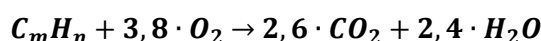
<b>oxid uhelnatý</b>	<b>metan</b>
$CO + 0,5 \cdot O_2 \rightarrow CO_2$ $1 m^3 + 0,5 m^3 \rightarrow 1 m^3$	$CH_4 + 2 \cdot O_2 \rightarrow CO_2 + 2 \cdot H_2O$ $1 m^3 + 2 m^3 \rightarrow 1 m^3 + 2 m^3$
<b>vodík</b>	<b>etan</b>
$H_2 + 0,5 \cdot O_2 \rightarrow H_2O$ $1 m^3 + 0,5 m^3 \rightarrow 1 m^3$	$C_2H_6 + 3,5 \cdot O_2 \rightarrow 2 \cdot CO_2 + 3 \cdot H_2O$ $1 m^3 + 3,5 m^3 \rightarrow 2 m^3 + 3 m^3$
<b>sulfan</b>	<b>propan</b>
$H_2S + 1,5 \cdot O_2 \rightarrow SO_2 + H_2O$ $1 m^3 + 1,5 m^3 \rightarrow 1 m^3 + 1 m^3$	$C_3H_8 + 5 \cdot O_2 \rightarrow 3 \cdot CO_2 + 4 \cdot H_2O$ $1 m^3 + 5 m^3 \rightarrow 3 m^3 + 4 m^3$

Pro uhlovodíky, které jsou typickou složkou plyných paliv, platí obecná rovnice:

*nasyčené uhlovodíky*



*nenasyčené uhlovodíky*



plyny přecházející přímo do spalín (se stopovým množstvím látek jako je  $NO$ ,  $N_2O$ ):



### Příklad 15

Ve spalinách vzniklých dokonalým spálením butanu byla naměřena koncentrace  $\text{CO}_2$  ve výši 13,3 %. Vypočítejte, s jakým přebytkem vzduchu spalování proběhlo.

Stechiometrický kyslík:

$$V_{O_2,t} = 6,5 \cdot C_4H_{10} = 6,5 \cdot 1 = 6,5 \text{ m}_N^3/\text{m}_N^3$$

Stechiometrický vzduch (suchý):

$$V_{vz,t}^s = \frac{V_{O_2,t}}{0,21} = \frac{6,5}{0,21} = 30,95 \text{ m}_N^3/\text{m}_N^3$$

Objem vzniklého oxidu uhličitého:

$$V_{CO_2} = 4 \cdot C_4H_{10} = 4 \cdot 1 = 4 \text{ m}_N^3/\text{m}_N^3$$

Objem dusíku ve spalinách:

$$V_{N_2,t} = 0,79 \cdot V_{vz,t}^s = 0,79 \cdot 30,95 = 24,45 \text{ m}_N^3/\text{m}_N^3$$

Objem spalin (suchých):

$$V_{sp,t}^s = V_{CO_2} + V_{N_2,t} = 4 + 24,45 = 28,45 \text{ m}_N^3/\text{kg}$$

Max. koncentrace oxidu uhličitého:

$$CO_{2,max} = \frac{V_{CO_2}}{V_{sp,t}^s} \cdot 100 = \frac{4}{28,45} \cdot 100 = 14,06 \%$$

Součinitel přebytku vzduchu:

$$n = 1 + \left( \frac{CO_{2,max}}{CO_{2,měř.}} - 1 \right) \cdot \frac{V_{sp,t}^s}{V_{vz,t}^s} = 1 + \left( \frac{14,06}{13,3} - 1 \right) \cdot \frac{28,45}{30,95} = 1,05$$

### Příklad 16

Suchým vzduchem s přebytkem 5 % je spalován zemní plyn o složení: 90 % metanu, 6 % etanu, 2 % oxidu uhličitého a 2 % dusíku. Vypočítejte množství spalovacího vzduchu a množství vzniklých spalin. Kolik kg vodní páry vznikne při spálení 35  $\text{m}_N^3$  zemního plynu? Kolikrát větší bude množství  $\text{CO}_2$  ve spalinách vzhledem k množství  $\text{CO}_2$  ve spalovaném plynu?

Stechiometrický kyslík:

$$V_{O_2,t} = 2 \cdot CH_4 + 3,5 \cdot C_2H_6 = 2 \cdot 0,9 + 3,5 \cdot 0,06 = 2,01 \text{ m}_N^3/\text{m}_N^3$$

Stechiometrický vzduch (suchý):

$$V_{vz,t}^s = \frac{V_{O_2,t}}{0,21} = \frac{2,01}{0,21} = 9,57 \text{ m}_N^3/\text{m}_N^3$$

Množství spalovacího vzduchu:

$$V_{vz,sk}^s = n \cdot V_{vz,t}^s = 1,05 \cdot 9,57 = 10,05 \text{ m}_N^3/\text{m}_N^3$$

Množství vzniklého CO<sub>2</sub>:

$$V_{CO_2} = CH_4 + 2 \cdot C_2H_6 + CO_2 = 0,9 + 2 \cdot 0,06 + 0,02 = 1,04 \text{ m}_N^3/\text{m}_N^3$$

Množství vzniklé páry:

$$V_{H_2O} = 2 \cdot CH_4 + 3 \cdot C_2H_6 = 2 \cdot 0,9 + 3 \cdot 0,06 = 1,98 \text{ m}_N^3/\text{m}_N^3$$

Množství dusíku ze vzduchu a z plynu:

$$V_{N_2} = N_2 + 0,79 \cdot V_{vz,sk}^s = 0,02 + 0,79 \cdot 10,05 = 7,96 \text{ m}_N^3/\text{m}_N^3$$

Množství nespotřebovaného kyslíku:

$$V_{O_2} = 0,21 \cdot (n - 1) \cdot V_{vz,t}^s = 0,21 \cdot (1,05 - 1) \cdot 9,57 = 0,1 \text{ m}_N^3/\text{m}_N^3$$

Množství skutečných spalín vlhkých:

$$V_{sp,sk}^v = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2,r} + V_{O_2} = 1,04 + 1,98 + 7,96 + 0,1 = 11,08 \text{ m}_N^3/\text{m}_N^3$$

Absolutní množství vodní páry:

$$m_{H_2O} = V_{H_2O} \cdot V_{pal} \cdot \rho_{H_2O} = 1,98 \cdot 35 \cdot \frac{18}{22,4} = 55,7 \text{ kg}$$

Násobek CO<sub>2</sub>:

$$x = \frac{V_{CO_2}}{V_{CO_2,pal}} = \frac{1,04}{0,02} = 52$$

### Příklad 17

Bioplynová stanice zpracovávající odpady z potravinářství produkuje bioplyn o výhřevnosti 21,6 MJ/m<sub>N</sub><sup>3</sup>. Plyn je složen z 58,7 % CH<sub>4</sub>, 1,1 % C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, 2,3 % C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, 28,6 % CO<sub>2</sub>, 4,1 % dusíku, 1,8 % sulfanu, 0,5 % vodíku, 1 % CO a 1,9 % kyslíku. S přebytkem vzduchu 20 % je spalován v KGJ o el. výkonu 521 kW a el. účinnosti 41 %. Součinitel zvětšení objemu vlivem vlhkosti je 1,03. Stanovte složení vlhkých spalín a množství CO<sub>2</sub> v kg vyprodukovaného KGJ za hodinu provozu.

Stechiometrický kyslík:

$$\begin{aligned} V_{O_2,t} &= 2 \cdot CH_4 + 3,5 \cdot C_2H_6 + 5 \cdot C_3H_8 + 0,5 \cdot H_2 + 0,5 \cdot CO + 1,5 \cdot H_2S - O_2 \\ &= 2 \cdot 0,587 + 3,5 \cdot 0,011 + 5 \cdot 0,023 + 0,5 \cdot 0,005 + 0,5 \cdot 0,01 + 1,5 \cdot 0,018 - 0,019 = \\ &1,343 \text{ m}_N^3/\text{m}_N^3 \end{aligned}$$

Stechiometrický vzduch (suchý):

$$V_{vz,t}^s = \frac{V_{O_2,t}}{0,21} = \frac{1,343}{0,21} = 6,395 \text{ m}_N^3/\text{m}_N^3$$

Množství spalovacího vzduchu (suchý):

$$V_{vz,sk}^s = n \cdot V_{vz,t}^s = 1,2 \cdot 6,395 = 7,674 \text{ m}_N^3/\text{m}_N^3$$

Množství spalovacího vzduchu (vlhký):

$$V_{vz,sk}^v = v \cdot V_{vz,sk}^s = 1,03 \cdot 7,674 = 7,905 \text{ m}_N^3/\text{m}_N^3$$

Množství vzniklého CO<sub>2</sub>:

$$V_{CO_2} = CH_4 + 2 \cdot C_2H_6 + 3 \cdot C_3H_8 + CO + CO_2 = 0,587 + 2 \cdot 0,011 + 3 \cdot 0,023 + 0,01 + 0,286 = 0,974 \text{ m}_N^3/\text{m}_N^3$$

Množství vzniklého SO<sub>2</sub>:

$$V_{SO_2} = H_2S = 0,018 = 0,018 \text{ m}_N^3/\text{m}_N^3$$

Množství dusíku ze vzduchu a z plynu:

$$V_{N_2} = N_2 + 0,79 \cdot V_{vz,sk}^s = 0,041 + 0,79 \cdot 7,674 = 6,104 \text{ m}_N^3/\text{m}_N^3$$

Množství nespotřebovaného kyslíku:

$$V_{O_2} = 0,21 \cdot (n - 1) \cdot V_{vz,t}^s = 0,21 \cdot (1,2 - 1) \cdot 6,395 = 0,269 \text{ m}_N^3/\text{m}_N^3$$

Množství vzniklé páry:

$$V_{H_2O} = 2 \cdot CH_4 + 3 \cdot C_2H_6 + 4 \cdot C_3H_8 + 1 \cdot H_2 + 1 \cdot H_2S + (v - 1) \cdot V_{vz,sk}^s = 2 \cdot 0,587 + 3 \cdot 0,011 + 4 \cdot 0,023 + 4 \cdot 0,005 + 1 \cdot 0,018 + (1,03 - 1) \cdot 7,674 = 1,552 \text{ m}_N^3/\text{m}_N^3$$

Množství vlhkých spalin:

$$V_{sp,sk}^v = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{O_2} + V_{H_2O} = 0,974 + 0,018 + 6,104 + 0,269 + 1,552 = 8,917 \text{ m}_N^3/\text{m}_N^3$$

Spotřeba paliva:

$$\dot{V}_{pal} = \frac{P}{Q_i \cdot \eta} = \frac{521}{21600 \cdot 0,41} \cdot 3600 = 211,8 \text{ m}_N^3/h$$

Produkce CO<sub>2</sub>:

$$\dot{m}_{CO_2} = V_{CO_2} \cdot \dot{V}_{pal} \cdot \rho_{CO_2} = 0,974 \cdot 211,8 \cdot \frac{44}{22,4} = 405,2 \text{ kg/h}$$

## cvičení 10

### Nedokonalé spalování

K nedokonalému spalování dochází při nedostatku oksyličovadla, což nastává pochopitelně při **podstechiometrickém spalování** ( $n < 1$ ), ale i při **nadstechiometrickém spalování** ( $n > 1$ ), kdy je sice oksyličovadlo přítomno v dostatečném množství, ale nezúčastňuje se chemické reakce.

Tato situace typicky nastává při spalování tuhých paliv, kdy je složitější zajistit přístup oksyličovadla k hořavině. V případě plyných a kapalných paliv k tomu dochází méně často, jelikož promíchání paliva s oksyličovadlem je snáze proveditelné (např. vířením plynu, rozprášením jemných kapiček).

Problematika nedokonalého spalování se proto často redukuje pouze na řešení spalovací rovnice uhlíku, který zůstává nespálen v tuhých zbytcích, nebo reaguje jen na oxid uhelnatý. O nedokonalém spalování mluvíme tehdy, je-li nedopal v tuhých zbytcích  $> 5\%$ .

Při nedokonalém spalování uvažujeme s tím, že:

- část **a** uhlíku shoří dokonale na  $\text{CO}_2$
- část **b** uhlíku shoří nedokonale na  $\text{CO}$
- část **c** uhlíku neshoří vůbec

$$a + b + c = 1$$

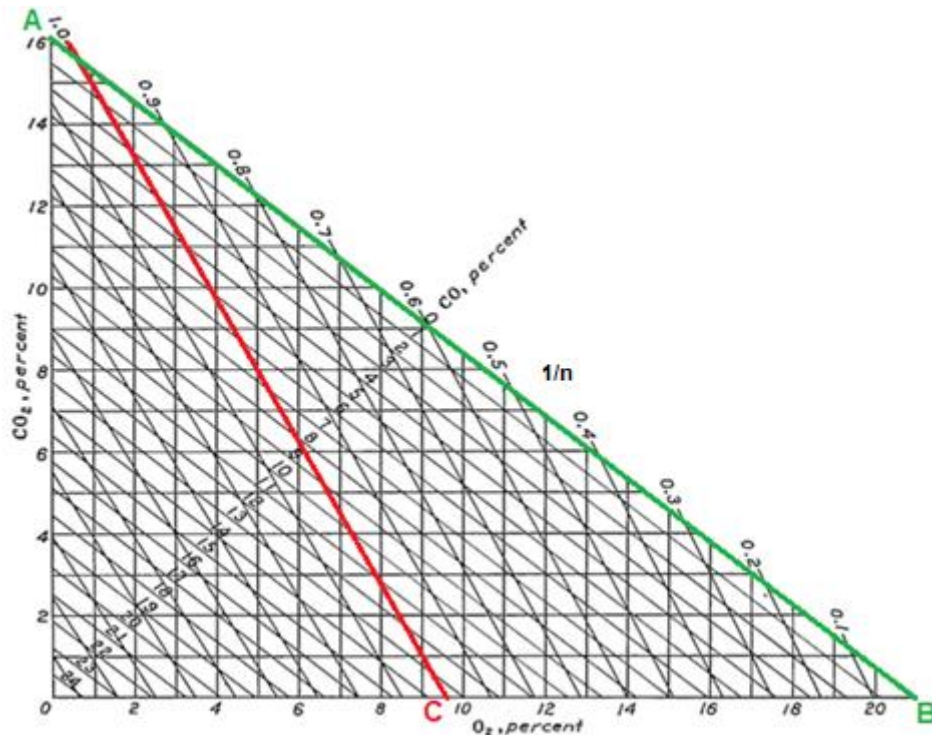
**Poznámka:** Pro zvýraznění rozdílu mezi dokonalým a nedokonalým spalováním, zde místo molárního objemu ideálního plynu dosazujeme molární objemy skutečných plynů (viz tabulka v cvičení 6).

spalování uhlíku dokonalé	spalování uhlíku nedokonalé
$C + O_2 \rightarrow CO_2 + q$	$C + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO + q$
$1 \text{ kmol} + 1 \text{ kmol} \rightarrow 1 \text{ kmol} + 406,3 \text{ MJ}$	$1 \text{ kmol} + \frac{1}{2} \text{ kmol} \rightarrow 1 \text{ kmol} + 151,4 \text{ MJ}$
$12 \text{ kg} + 22,39 \text{ m}^3 \rightarrow 22,26 \text{ m}^3$	$12 \text{ kg} + \frac{22,39}{2} \text{ m}^3 \rightarrow 22,4 \text{ m}^3$
$1 \text{ kg} + \frac{22,39}{12} \text{ kg} \rightarrow \frac{22,26}{12} \text{ kg} + 33,8 \text{ MJ}$	$1 \text{ kg} + \frac{22,39}{24} \text{ kg} \rightarrow \frac{22,4}{12} \text{ kg} + 12,64 \text{ MJ}$

Z tabulky je zřejmé, že shoří-li uhlík pouze na  $\text{CO}$ , získáme přibližně jen třetinu tepelné energie v porovnání s dokonalým spálením uhlíku na  $\text{CO}_2$ .

Míra dokonalosti spalování se posuzuje na základě výsledku analýzy spalin (koncentrace  $O_2$ ,  $CO_2$  a  $CO$ ), nebo s využitím Ostwaldova spalovacího trojúhelníku. Ten je sestaven vždy pro konkrétní palivo s jistým zjednodušením:

- suché spaliny
- nedopal v tuhých zbytcích je nulový (není přítomen nespálený uhlík)



Bod A představuje stav dokonalého spalování s nulovou koncentrací kyslíku ve spalinách a max. koncentrací  $CO_2$ .

Bod B je také dokonalé spalování, kdy naopak koncentrace kyslíku je max. a koncentrace  $CO_2$  je nulová (teoreticky při nekonečně velkém přebytku).

Bod C je stav nedokonalého spalování, kdy při přebytku vzduchu  $n=1$  všechen uhlík v palivu shoří na  $CO$ .

Známe-li alespoň dvě ze tří koncentrací  $O_2$ ,  $CO_2$  a  $CO$ , můžeme pak z trojúhelníku zjistit třetí koncentraci a přebytek vzduchu.

### Příklad 18

Máme 9 kg uhlíku, 4 kg vodíku, 1 kg síry a 200 m<sup>3</sup> vlhkého vzduchu při teplotě 20 °C a tlaku 0,1 MPa, jehož vlhkost je dána součinitelem zvětšení objemu vlhkostí vzduchu =1,03. Všechny uhlík shoří tak, že nedopal je nulový. Stanovte složení spalin v procentech objemu.



Přepoččet vzduchu na normální podmínky:

$$V_{vz,sk}^v = V_{vz,sk,ef}^v \cdot \frac{T_N}{T_{ef}} \cdot \frac{p_{ef}}{p_N} = 200 \cdot \frac{273,15}{293,15} \cdot \frac{100000}{101325} = 183,92 \text{ m}_N^3$$

Množství suchého vzduchu pro spalování:

$$V_{vz,sk}^s = \frac{V_{vz,sk}^v}{\nu} = \frac{183,92}{1,03} = 178,56 \text{ m}_N^3$$

Kyslík k dispozici:

$$V_{O_2} = 0,21 \cdot V_{vz,sk}^s = 0,21 \cdot 178,56 = 37,50 \text{ m}_N^3$$

Kyslík potřebný:

$$V_{O_2,t} = \frac{22,39}{12} \cdot C + \frac{22,39}{4} \cdot H + \frac{22,39}{32} \cdot S = \frac{22,39}{12} \cdot 9 + \frac{22,39}{4} \cdot 4 + \frac{22,39}{32} \cdot 1 = 39,88 \text{ m}_N^3$$

Spalování bude probíhat v podstechiometrickém režimu ( $n=0,94$ ). Jako první shoří vodík a pak síra. Na uhlík už nezbyde dostatek kyslíku, aby veškerý shořel až na  $CO_2$ , proto bude ve spalinách zvýšená koncentrace CO.

Množství kyslíku potřebného ke shoření uhlíku jen na CO:

$$V_{O_2,nedok} = \frac{11,195}{12} \cdot C + \frac{22,39}{4} \cdot H + \frac{22,39}{32} \cdot S = \frac{11,195}{12} \cdot 9 + \frac{22,39}{4} \cdot 4 + \frac{22,39}{32} \cdot 1 = 31,49 \text{ m}_N^3$$

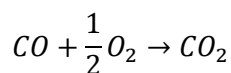
Kyslík zbývající pro oxidaci CO na  $CO_2$ :

$$V_{O_2,zbyt} = V_{O_2} - V_{O_2,nedok} = 37,50 - 31,49 = 6,01 \text{ m}_N^3$$

Množství vzniklého CO:

$$V_{CO} = \frac{22,4}{12} \cdot C = \frac{22,4}{12} \cdot 9 = 16,80 \text{ m}_N^3$$

Množství CO, které může zbývajícím kyslíkem dále reagovat na  $CO_2$ :



$$22,4 + \frac{1}{2} \cdot 22,39 \rightarrow 22,26$$

$$V_{CO, reag} = \frac{2 \cdot 22,4}{22,39} \cdot V_{O_2, zbyl} = \frac{2 \cdot 22,4}{22,39} \cdot 6,01 = 12,03 \text{ m}_N^3$$

Množství CO, které zůstane ve spalinách:

$$V_{CO, sp} = V_{CO} - V_{CO, reag} = 16,80 - 12,03 = 4,77 \text{ m}_N^3$$

Množství vzniklého  $CO_2$ :

$$V_{CO_2} = \frac{22,26}{22,4} \cdot V_{CO, reag} = \frac{22,26}{22,4} \cdot 12,03 = 11,95 \text{ m}_N^3$$

Ostatní složky spalín:

$$V_{SO_2} = \frac{21,89}{32} \cdot S = \frac{21,89}{32} \cdot 1 = 0,68 \text{ m}_N^3$$

$$V_{N_2} = 0,79 \cdot V_{vz,sk}^s = 0,79 \cdot 178,56 = 141,06 \text{ m}_N^3$$

$$V_{H_2O} = \frac{22,4}{2} \cdot H + (v - 1) \cdot V_{vz,sk}^s = \frac{22,4}{18} \cdot 4 + (1,03 - 1) \cdot 178,56 = 50,16 \text{ m}_N^3$$

Objem vzniklých spalín:

$$\begin{aligned} V_{sp,sk}^v &= V_{CO,sp} + V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{H_2O} = 4,77 + 11,95 + 0,68 + 141,06 + 50,16 \\ &= 208,62 \text{ m}_N^3 \end{aligned}$$

Koncentrace složek ve spalínách:

$$CO = \frac{V_{CO,sp}}{V_{sp,sk}^v} = \frac{4,77}{208,62} = 2,29 \%$$

$$CO_2 = \frac{V_{CO_2}}{V_{sp,sk}^v} = \frac{11,95}{208,62} = 5,73 \%$$

$$SO_2 = \frac{V_{SO_2}}{V_{sp,sk}^v} = \frac{0,68}{208,62} = 0,33 \%$$

$$N_2 = \frac{V_{N_2}}{V_{sp,sk}^v} = \frac{141,06}{208,62} = 67,61 \%$$

$$H_2O = \frac{V_{H_2O}}{V_{sp,sk}^v} = \frac{50,16}{208,62} = 24,04\%$$

$$\sum X_i = CO + CO_2 + N_2 + SO_2 + O_2 + H_2O = 2,29 + 5,73 + 0,33 + 67,61 + 24,04 = 100 \%$$

## cvičení 11

### Emise

Nejpřesnější metoda stanovení množství znečišťujících látek vypouštěných do ovzduší energetickým zdrojem je **měření**.

Používané jednotky – molární (objemové) zlomky

%	ppm	ppb
počet částic ve stu	počet částic v milionu	počet částic v miliardě
$10^{-2}$	$10^{-6}$	$10^{-9}$

1% = 10 000 ppm = 10 000 000 ppb

Řády koncentrací jednotlivých složek spalin

CO <sub>2</sub>	CO	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	PM	TOC	Hg	Těžké kovy	PAU	PCDD/F
%	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppb	ppm	ppm	ppb

PM – prachové částice (particulate matter), TOC – celkový organický uhlík, PAU – polycyklické aromatické uhlovodíky, PCDD – dioxiny, PCDF – furany

Praním uhlí lze odstranit 25 – 40 % S a 30 % Hg. Nízkou teplotou spalování lze omezit NO<sub>x</sub>.

#### Hmotnostní koncentrace znečišťujících látek (ZL)

$$\frac{mg}{m^3_N} = ppm \cdot \frac{M}{V_m}$$

M – molární hmotnost [kg/kmol]  
V<sub>m</sub> – molární objem [m<sup>3</sup>/kmol]

Tyto přepočtené koncentrace jsou porovnávány s emisními limity (EL).

#### Přepočet na normální podmínky

K přepočtu z efektivních na normální podmínky se využije stavová rovnice:

$$Koncentrace_N = Koncentrace_{EF} \cdot \frac{T_{měř}}{273,15} \cdot \frac{101,325}{p_{měř}}$$

#### Přepočet na referenční kyslík

Pro zajištění dokonalého spálení paliva je přiváděn přebytek spalovacího vzduchu. Jeho stanovení probíhá prostřednictvím měření koncentrace kyslíku ve spalinách. Čím vyšší bude koncentrace kyslíku, tím více jsou spaliny naředěny, což se projeví na koncentraci ZL. Z tohoto důvodu se používá přepočet na referenční hodnotu koncentrace kyslíku:

$$SO_{2,ref} = SO_{2,měř} \cdot \frac{21 - O_{2,ref}}{21 - O_{2,měř}} [mg \cdot m^{-3}]$$

$O_{2ref}$  – 11 % pro tuhé odpady, 6 % pro tuhá paliva vč. biomasy, 3% pro kapalná a plynná paliva

### Emisní faktor (EF)

V případech, kdy koncentrace nejsou měřeny, se pro výpočet množství produkováných ZL používají emisní faktory. Ty představují průměrné měrné emise charakteristické pro konkrétní skupinu zdrojů. Obvykle se vyjadřují jako poměr mezi hmotností ZL a hmotností, objemem nebo výhřevností paliva - kg/t, g/m<sup>3</sup>, kg/kWh, kg/GJ.

#### Příklad 19

Skládkový plyn o složení: 53 % CH<sub>4</sub>, 37 % CO<sub>2</sub>, 9,5 % N<sub>2</sub>, 0,5 % H<sub>2</sub>S je spalován ve spalovacím motoru s přebytkem vzduchu 10 %. Součinitel zvětšení objemu vlivem vlhkosti je 1,03. Motor za hodinu provozu vyprodukuje 300 m<sup>3</sup> spalin. Při teplotě 190°C a přetlaku 17 kPa byla změřena koncentrace NO<sub>x</sub> 175 ppm. Splňuje tento motor EL pro NO<sub>x</sub> (500 mg/m<sub>N</sub><sup>3</sup>) a je možné jej provozovat bez úpravy plynu s ohledem na koncentraci SO<sub>2</sub> (EL 107 mg/m<sub>N</sub><sup>3</sup>)?

Stechiometrický kyslík:

$$V_{O_2,t} = 2 \cdot CH_4 + 1,5 \cdot H_2S = 2 \cdot 0,53 + 1,5 \cdot 0,05 = 1,068 \text{ m}_N^3/\text{m}_N^3$$

Stechiometrický vzduch (suchý):

$$V_{vz,t}^s = \frac{V_{O_2,t}}{0,21} = \frac{1,068}{0,21} = 5,083 \text{ m}_N^3/\text{m}_N^3$$

Skutečný vzduch (suchý):

$$V_{vz,sk}^s = n \cdot V_{vz,t}^s = 1,1 \cdot 5,083 = 5,592 \text{ m}_N^3/\text{m}_N^3$$

Skutečný vzduch (vlhký):

$$V_{vz,sk}^v = v \cdot V_{vz,sk}^s = 1,03 \cdot 5,592 = 5,759 \text{ m}_N^3/\text{m}_N^3$$

CO<sub>2</sub> ve spalinách:

$$V_{CO_2} = CH_4 + CO_2 = 0,53 + 0,37 = 0,9 \text{ m}_N^3/\text{m}_N^3$$

SO<sub>2</sub> ve spalinách:

$$V_{SO_2} = H_2S = 0,005 \text{ m}_N^3/\text{m}_N^3$$

N<sub>2</sub> ve spalinách:

$$V_{N_2,sk} = N_2 + 0,79 \cdot V_{vz,sk}^s = 0,095 + 0,79 \cdot 5,592 = 4,512 \text{ m}_N^3/\text{m}_N^3$$

Nespotřebovaný kyslík ve spalinách:

$$V_{O_2} = 0,21 \cdot (n - 1) \cdot V_{vz,t}^s = 0,21 \cdot (1,1 - 1) \cdot 5,083 = 0,107 \text{ m}_N^3/\text{m}_N^3$$

Suché spaliny:

$$V_{sp,sk}^s = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2,sk} + V_{O_2} = 0,9 + 0,005 + 4,512 + 0,107 = 5,524 \text{ m}_N^3/\text{m}_N^3$$

Molární zlomek O<sub>2</sub>:

$$O_2 = \frac{V_{O_2}}{V_{sp,sk}^s} \cdot 100 = \frac{0,107}{5,524} \cdot 100 = 1,93 \%$$

Molární zlomek SO<sub>2</sub>:

$$SO_2 = \frac{V_{SO_2}}{V_{sp,sk}^s} \cdot 100 = \frac{0,005}{5,524} \cdot 100 = 0,09 \% = 900 \text{ ppm}$$

Hmotnostní koncentrace SO<sub>2</sub>:

$$C_{SO_2} = SO_2 \cdot \frac{M_{SO_2}}{V_m} = 900 \cdot \frac{32 + 32}{22,4} = 2571 \text{ mg/m}_N^3$$

Přepoččet SO<sub>2</sub> na referenční kyslík:

$$C_{SO_2,ref} = C_{SO_2} \cdot \frac{21 - O_{2,ref}}{21 - O_{2,měř}} = 2571 \cdot \frac{21 - 3}{21 - 1,93} = 2427 \text{ mg/m}_N^3$$

Hmotnostní koncentrace NO<sub>x</sub> (vyjádřeno jako NO<sub>2</sub>):

$$C_{NO_x} = NO_x \cdot \frac{M_{NO_2}}{V_m} = 175 \cdot \frac{14 + 32}{22,4} = 359 \text{ mg/m}^3$$

Hmotnostní koncentrace NO<sub>x</sub> přepočteno na normální podmínky:

$$C_{NO_x,N} = C_{NO_x} \cdot \frac{T}{273,15} \cdot \frac{101,325}{p} = 359 \cdot \frac{273,15 + 190}{273,15} \cdot \frac{101,325}{101,325 + 17} = 522 \text{ mg/m}_N^3$$

Přepoččet NO<sub>x</sub> na referenční kyslík:

$$C_{NO_x,ref} = C_{NO_x,N} \cdot \frac{21 - O_{2,ref}}{21 - O_{2,měř}} = 522 \cdot \frac{21 - 3}{21 - 1,93} = 493 \text{ mg/m}_N^3$$

EL pro NO<sub>x</sub> není překročen, naopak pro SO<sub>2</sub> by byl překročen téměř 23x. Plyn tedy musí být zbaven velké části H<sub>2</sub>S, nebo spaliny musí být odsířeny.

## cvičení 12

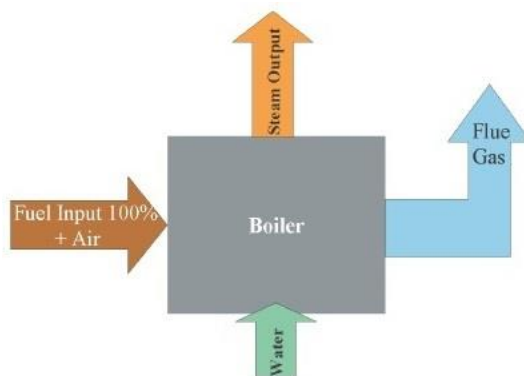
### Energetická účinnost kotlů

Existují dva způsoby, jak stanovit účinnost kotle:

#### 1) Přímá metoda

Vstupní i výstupní parametry kotle jsme schopni určit, tudíž tato metoda je vhodná pro spalování kapalných a plyných paliv, kdy lze průtok paliva snadno změřit.

$$\eta = \frac{\text{energie na výstupu}}{\text{energie na vstupu}} \cdot 100 = \frac{\dot{m}_{\text{pára}} \cdot \Delta i}{\dot{m}_{\text{palivo}} \cdot Q_i} \cdot 100 [\%]$$



#### 2) Nepřímá metoda

Tato metoda se využije v případě, kdy okamžitá spotřeba paliva nemůže být snadno vyhodnocena – typicky při spalování tuhých paliv. Nepřímá metoda je početně náročnější, avšak s její pomocí lze zjistit příčiny v odchylce skutečné hodnoty účinnosti od projektované.

$$\text{Energie na výstupu} = \text{Energie na vstupu} - \text{Ztráty energie}$$

$$\eta = 100 - \sum \xi_i [\%]$$

Energetické ztráty vznikají vlivem nedokonalosti spalování a nemožnosti úplného využití uvolněného tepla v průběhu spalovacího procesu.

- Ztráta způsobená únikem tepla ve spalínách do okolí (citelné teplo suchých spalín + latentní teplo vodní páry) – ztráta citelným teplem spalín (komínová ztráta)
- Ztráta způsobená nespálením plyných složek obsažených ve spalínách (CO, uhlovodíky aj.) – ztráta hořlavinou ve spalínách (chemický nedopal)
- Ztráta způsobená nespálením uhlíku v tuhých zbytcích (popel, popílek aj.) – ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích (mechanický nedopal)
- Ztráta způsobená teplem akumulovaným v tuhých zbytcích odvedených z kotle – ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků
- Ztráta způsobená sdílením tepla do okolí – ztráta sáláním

### Ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích

Tuhými zbytky mohou být úlet (popílek vypuštěný komínem), struska/škvára (odvedená z kotle), propad (palivo propadnuté roštem) a prachové částice zachycené filtrem.

$$\xi_C = \frac{C}{100 - C} \cdot \frac{A^r \cdot X \cdot Q_{i,C}}{100 \cdot Q_{i,paliva}} [\%]$$

C – obsah uhlíku v tuhém zbytku [%],  $A^r$  – popelovina v palivu (surový stav) [%], X – stupeň zachycení tuhého zbytku [%] ( $\sum X_i = 100$ ),  $Q_{i,C}$  – výhřevnost uhlíku (32 600) [kJ/kg],  $Q_{i,paliva}$  – výhřevnost paliva [kJ/kg]

### Ztráta hořlavinou ve spalinách

Dominantní nespálenou plynnou složkou spalin je CO. V menším množství mohou být přítomny také uhlovodíky nebo vodík, jejich zanedbání však vzhledem ke koncentracím nevede k významnému ovlivnění výsledku výpočtu ztráty.

$$\xi_{CO} = \frac{100 - \xi_C}{100} \cdot \frac{V_{sp,sk}^s \cdot CO \cdot Q_{i,CO}}{Q_{i,paliva}} [\%]$$

$V_{sp,sk}^s$  – skutečné množství suchých spalin [ $m_N^3/kg$ ,  $m_N^3/m_N^3$ ], CO – koncentrace v suchých spalinách [%],  $Q_{i,CO}$  – výhřevnost CO (12 610) [kJ/ $m_N^3$ ]

### Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků

$$\xi_f = \frac{A^r}{100 - C} \cdot \frac{X}{Q_{i,paliva}} \cdot c_{tz} \cdot t_{tz} [\%]$$

$c_{tz}$  – měrná tepelná kapacita tuhého zbytku [kJ/(kg.K)],  $t_{tz}$  – teplota tuhého zbytku [°C]

### Komínová ztráta

Komínová ztráta výrazně závisí na přebytku spalovacího vzduchu a teplotě spalin za poslední teplosměnnou plochou.

$$\xi_k = \left(100 - \sum \xi_C\right) \cdot \frac{V_{sp,sk}^v}{Q_{i,paliva}} \cdot c_{sp} \cdot (t_{sp} - t_{vz}) [\%]$$

$V_{sp,sk}^v$  – objem skutečných vlhkých spalin [ $m_N^3/kg$ ,  $m_N^3/m_N^3$ ],  $c_{sp}$  – směrná tepelná kapacita spalin při střední teplotě ( $t_{sp}/2 + t_{vz}/2$ ) [kJ/( $m_N^3.K$ )],  $t_{vz}$  – teplota okolí (teplota vzduchu před ohřevem) [°C]

### Ztráta sáláním

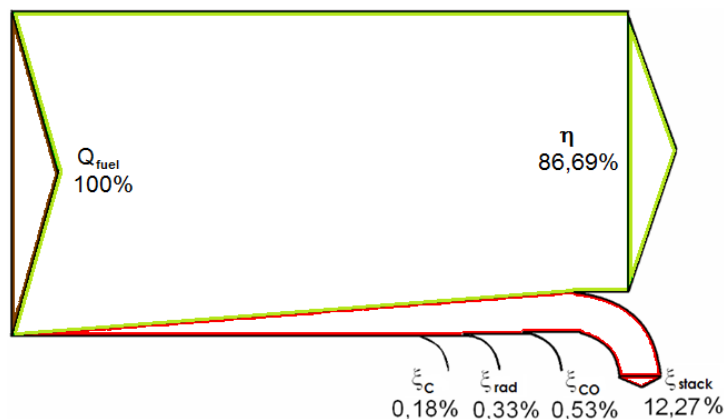
Závisí především na velikosti zařízení a jeho tepelném výkonu. Obvykle se stanovuje z nomogramu nebo empiricky.

### Celková ztráta

$$\xi = \xi_C + \xi_{CO} + \xi_f + \xi_k + \xi_s$$

Pokud chceme zvýšit účinnost kotle, snížení komínové ztráty by mělo být prioritní.

## Sankeyův diagram kotle o výkonu 35 kW spalujícího dřevní pelety



Pozn.: rad = ztráta sáláním, stack = ztráta komínová

### Příklad 20

Zemní plyn s výhřevností  $34,2 \text{ MJ/m}_N^3$  je spalován v plynovém kotli na výrobu páry. Součinitel zvětšení objemu vlivem vlhkosti je 1,03. Složení paliva je následující: 97,7 %  $\text{CH}_4$ , 1,2 %  $\text{C}_2\text{H}_6$ , 0,5 %  $\text{C}_3\text{H}_8$  a 0,6 %  $\text{N}_2$ . Teplota spalin za ohřívákem vzduchu je  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ . Koncentrace  $\text{O}_2$  (2,2 %) a CO (700 ppm) byly měřeny v suchých spalinách.

Určete energetickou účinnost kotle nepřímou metodou. Ztrátu sáláním uvažujte ve výši 2 %. Vypočítejte emise CO v  $\text{mg/m}_N^3$  při referenčním obsahu kyslíku 3 %. Měrnou tepelnou kapacitu spalin uvažujte  $1,36 \text{ kJ/m}_N^3 \cdot \text{K}$ .

Stechiometrický vzduch:

$$V_{\text{O}_2,t} = 2 \cdot \text{CH}_4 + 3,5 \cdot \text{C}_2\text{H}_6 + 5 \cdot \text{C}_3\text{H}_8 - \text{O}_2 = 2,021 \text{ m}_N^3 \cdot \text{m}_N^{-3}$$

$$V_{\text{vz},t}^s = V_{\text{O}_2,t} \cdot \frac{1}{0,21} = 9,624 \text{ m}_N^3 \cdot \text{m}_N^{-3}$$

Stechiometrické spaliny (suché):

$$V_{\text{CO}_2} = \text{CH}_4 + 2 \cdot \text{C}_2\text{H}_6 + 3 \cdot \text{C}_3\text{H}_8 = 1,016 \text{ m}_N^3 \cdot \text{m}_N^{-3}$$

$$V_{\text{N}_2,t} = \text{N}_2 + 0,79 \cdot V_{\text{vz},t}^s = 7,609 \text{ m}_N^3 \cdot \text{m}_N^{-3}$$

$$V_{\text{sp},t}^s = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{N}_2,t} = 8,625 \text{ m}_N^3 \cdot \text{m}_N^{-3}$$

Součinitel přebytku vzduchu:

$$n = 1 + \frac{\text{O}_2}{21 - \text{O}_2} \cdot \frac{V_{\text{sp},t}^s}{V_{\text{vz},t}^s} = 1 + \frac{2,2}{21 - 2,2} \cdot \frac{8,625}{9,624} = 1,1$$

Skutečné spaliny (suché)

$$V_{\text{sp},sk}^s = V_{\text{sp},t}^s + (n - 1) \cdot V_{\text{vz},t}^s = 8,625 + (1,1 - 1) \cdot 9,624 = 9,634 \text{ m}_N^3 \cdot \text{m}_N^{-3}$$



Skutečné spaliny (vlhké)

$$V_{H_2O} = 2 \cdot CH_4 + 3 \cdot C_2H_6 + 4 \cdot C_3H_8 + (v-1) \cdot V_{vz,sk}^s = 2,329 \text{ m}_N^3 \cdot \text{m}_N^{-3}$$

$$V_{sp,sk}^v = V_{sp,sk}^s + V_{H_2O} = 9,634 + 2,329 = 11,963 \text{ m}_N^3 \cdot \text{m}_N^{-3}$$

Ztráta mechanickým nedopalem:

$$\xi_C = \frac{C}{100-C} \cdot \frac{X}{100} \cdot \frac{A^r}{Q_i} \cdot Q_C = 0\%$$

Ztráta chemickým nedopalem:

$$\xi_{CO} = \frac{(100 - \xi_C)}{100} \cdot \frac{12610 \cdot \omega_{CO}}{Q_i} \cdot V_{sp,sk}^s = \frac{(100-0)}{100} \cdot \frac{12610 \cdot 700 \cdot 10^{-4}}{34200} \cdot 9,634 = 0,25\%$$

Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků:

$$\xi_f = \frac{X}{100-C} \cdot \frac{A^r \cdot (c_f \cdot t)}{Q_i} = 0\%$$

Komínová ztráta:

$$\xi_K = \frac{(100 - \xi_C)}{100} \cdot \frac{V_{sp,sk}^v \cdot c_{sp} \cdot (t_{sp} - t_{vz})}{Q_i} \cdot 100$$

$$\xi_K = \frac{(100-0)}{100} \cdot \frac{11,963 \cdot 1,36 \cdot (150-20)}{34200} \cdot 100 = 6,18\%$$

Součet ztrát:

$$\sum \xi_i = 8,43 \%$$

Energetická účinnost kotle:

$$\eta = 100 - \sum \xi_i = 100 - 8,43 = 91,57\%$$

Emise CO v suchých spalinách:

$$CO = \rho_{CO} \cdot \omega_{CO} = \frac{12+16}{22,4} \cdot 700 = 875 \text{ mg} \cdot \text{m}_N^{-3}$$

Emise CO při referenčním kyslíku:

$$CO_{ref} = CO \cdot \frac{21 - O_{2,ref}}{21 - O_{2,měř.}} = 875 \cdot \frac{21-3}{21-2,2} = 837,8 \text{ mg} \cdot \text{m}_N^{-3}$$

Pro srovnání:

<b>Technologie</b>	<b>Energetická účinnost</b>
parní lokomotiva	6 %
typický benzínový motor osobního vozu	25-30 %
typický dieselový motor osobního vozu	30-35 %
nejnovější motory Formule 1	45-50 %
jaderná elektrárna	33 %
uhelná elektrárna	max. 48 %
největší dieselový motor (pohon lodí, výkon 80 000 kW)	52 %
kombinovaný paroplynový cyklus	max. 60 %
plynový kotel pro vytápění domácností (nekondenzační)	>90 %

<b>Palivo</b>	Vytěžené uhlí										
<b>Hrubý rozbor</b>	Hořlavina <b>h</b>					Popelovina <b>M</b>			Voda <b>W</b>		
<b>Sušení na vzduchu</b>	Analytický vzorek									Hrubá voda	Přimíšená voda
<b>Sušení při 105°C</b>	Sušina						Zbytková voda				
	Spalitelná					Nespalitelná					
<b>Spalování při 850°C</b>	Prchavá hořlavina <b>V</b>				Tuhý uhlík $C_{fix}$	$\Delta A$	Popel <b>A</b>		Voda <b>W</b>		
<b>Prvkový rozbor</b>	<b>S</b>	<b>N</b>	<b>O</b>	<b>H</b>	<b>C</b>						

**Poznámka:**

Přimíšená voda se dostává do paliva až po vytěžení. Do hrubého rozboru se nezapočítává, protože před provedením laboratorní analýzy se jednoduše odstraní (např. odtečením, odkapáním, filtrací apod.).

V hořlavině je síra spalitelná, nespalitelná síra se nachází v popelovině.

Delta A je část popeloviny, která se vlivem vysokých teplot uvolní a přejde do hořlaviny = zdánlivá hořlavina.

Ve zdánlivé hořlavině se objevuje i voda hydrátová (z popeloviny) a voda okludovaná (z hořlaviny).